

Riikka Liedes

Rakennuksen lämpökuormat sekä lämmityksen ennakoiva ja sääennustepohjainen säätö

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 19.2.2013.

Työn valvoja:

Prof. Kari Koskinen

Työn ohjaaja:

TkL Lauri Heikkinen



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Tekijä: Riikka Liedes

Työn nimi: Rakennuksen lämpökuormat sekä lämmityksen ennakoiva ja sääennustepohjainen säätö

Päivämäärä: 19.2.2013

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 7+90

Automaatio- ja systeemitekniikan laitos

Professuuri: Automaation tietotekniikka

Koodi: AS-116

Valvoja: Prof. Kari Koskinen

Ohjaaja: TkL Lauri Heikkinen

Rakennusten lämmitys, rakennuksissa käytetty huoneisto- ja kiinteistösähkö, rakennustarvikkeiden valmistus ja rakentaminen kattavat noin 40 % koko Suomen loppuenergiankäytöstä. Tämän energiankulutuksen vähennys tehdään niin kuluttajatasolla kuin uusien tekniikoiden kehitystyölläkin. Rakennussektorilla yleisesti älykkäiden ja oppivien menetelmien soveltaminen on ollut vielä harvinaista. Yksittäisiä sovelluksia löytyy kuitenkin ja tiedeyhteisö onkin ollut innokas ottamaan käyttöön sumeaa logiikkaa, neuroverkkoja ja prosessimalleja.

Tässä työssä esitellään rakennuksen lämmitykseen ja säätöön kokonaisuudessaan liittyvää aikaisempaa tutkimusta. Tämän avulla tutkitaan kuuden kohteen lämpökäyttäytymistä ja analysoidaan säädön kehittämistä. Kohteiden mittauksista tarkastellaan sisälämpötilan riippuvuutta kellonaikaan ja säähän. Tarkimmin tutkitaan Schneider Electricin Vantaan konttoria, jonka toiminnasta analysoidaan myös patteriverkoston toimivuutta.

Lopuksi esitellään neljä olemassa olevaa erilaista säätöratkaisua rakennusten lämmitykseen ja verrataan teoreettisesti niiden toimivuutta olemassa olevaan kohde-dataan. Lisäksi analysoidaan ratkaisujen hyviä ja huonoja puolia sekä pohditaan jatkokehitysmahdollisuuksia.

Avainsanat: kiinteistöautomaatio, rakennusautomaatio, lämmitys, säätö, energiansäästö, patteriverkosto, sääennuste

Author: Riikka Liedes

Title: Heat loads and predictive control in heating of buildings

Date: 19.2.2013

Language: Finnish

Number of pages: 7+90

Department of Automation and Systems Technology

Professorship: Information and Computer Systems in Automation Code: AS-116

Supervisor: Prof. Kari Koskinen

Instructor: Lic.Sc. (Tech.) Lauri Heikkinen

Heating, used electricity and constructions of buildings cover approximately 40 % of terminal use of energy in Finland. This energy consumption can be reduced by consumers and development of new technologies. Intelligent and learning methods have rarely adapted to building automation systems, although scientific community has been eager to introduce fuzzy logic, neural networks and process models. This thesis presents prior research of building heating and heating control, by means of which the heat budget and control are analysed in six different buildings. The interdependence between indoor temperature of the buildings and weather conditions is examined. The main case is Schneider Electric's office in Vantaa, Finland, where the functioning of the radiator network is analyzed. Finally, the thesis presents four different solutions for building heating control. The performances of these four heating control solutions are analyzed theoretically and compared to the obtained measurements. Also, the possibilities for further development are considered.

Keywords: building automation, heating, control, energy saving, radiator network, weather forecast

Esipuhe

Kiitän Professori Kari Koskista valvojana toimimisesta. Koin vahvasti saaneeni tarvittavan määrän tukea, ymmärrystä ja kiinnostusta kuitenkin ilman stressaavaa painostusta. Kiitän Karia myös hyvästä esimiestyöstä, kun aiemmin opintojeni aikana työskentelin hänen tutkimusryhmänsä assistenttina. Hän omalta osaltaan auttoi, että innostukseni automaatioon urana varmistui ja spesifi suuntaus kiinteistöjen järjestelmiin löytyi.

Kiitän myös erityisesti ohjaajaani Lauri Heikkistä. Ennen kaikkea kiitän häntä ja Schneider Electriciä mahdollisuudesta tehdä diplomityö nimenomaan kapeahkoon rakennusautomaation sektoriin. Lauria kiitän innostuksesta ja vimhasta sekä uuden kehittämiseen että visiointiin. Lisäksi kiitän toista epävirallisempaa ohjaajaani Svante Häggblomia työn käytännöntason ohjauksesta. Svanten energia ja aito kiinnostus on tarttuvaa ja häneltä sai tarvittaessa aivan kädestä pitäen johdatusta aiheessa eteenpäin.

Pitkän opiskelu-urani ajalle riittää ihmisiä, joita kiitän suuresti. Monet ovat jo unohtuneet, mutta olen kiitollinen jokaisen ryhmätyökaverin, assistentin, koulun henkilökunnan jäsenen ja opiskelutoverin jokaisesta avunannosta, tuesta ja ymmärtäväisestä asenteesta sekä siitä, että hölmöillekään kysymyksille ei naurettu. Aina. Erityisesti kiitän viimeisten vuosien suurten jaksamistaisteluiden hermoilta Panu Kiviluomaa, Mikko Hyväristä, Tuomo Malkamäkeä ja Erkki Kyyhkylä-Heikkistä.

Sanonta kuuluu, että valmistuminen keskeytti hyvin alkaneet opinnot. Itse lisään: luojan kiitos, vihdoinkin! Hetkeäkään en kadu ja kiitän mitä suurimmalla sydämellä teekkarikulttuuria ja -yhteisöä, jotka imaisivat syövereihinsä syksyllä 2004. Kiitän kotikiltaani AS:aa, ylioppilaskuntaani TKY:aa, ihania mammuttejani ITMK:aa, syrjähyppykiltaani SIK:aa, seitinohuita ystäväpiirejäni Kaljalle-porukkaa ja Joukkuetta sekä edustavaa Hankkijuutta. Erityisesti MINÄ! kuitenkin kiitän ajo-opetuksen saamisesta ja mitä tärkeimmän jäynäkulttuurin ylläpitämisestä rakkaan johtajamme Veikko Somman oppilaita. Teiltä kaikilta olen oppinut enemmän kuin koko yliopistolta yhteensä. Naks sille!

Lisäksi kiitän vielä Vegoseksuaaleja pitkästä ystävydestä sekä henkilökohtaisesti Emppaa isosiskoudesta, Chrischania veljeydestä, Eevaa kengurumeiningistä, Anssia luottopakkiudesta, Tuohista tietopankkiudesta, Centtiä kaikesta, Ennaa duunimaa-ilmasta, Annikaan kielipäästä, Miljaa naiseudesta ja Jukstea siitä, että on aina läsnä kysymyksiä varten. Eikkaa kiitän, koska olet olemassa.

Lärveiset myös Liedian Ilkalle ja Antille.

Otaniemi, 19.2.2013

Riikka Liedes

Sisältö

| | |
|--|------------|
| Tiivistelmä | ii |
| Tiivistelmä (englanniksi) | iii |
| Esipuhe | iv |
| Sisällysluettelo | v |
| Symbolit ja lyhenteet | vii |
| 1 Johdanto | 1 |
| 2 Aikaisempi tutkimus | 3 |
| 2.1 Rakennuksen lämmitys | 3 |
| 2.1.1 Lämpötase | 3 |
| 2.1.2 Lämmitystarve ja -tavat | 5 |
| 2.1.3 Energiankulutus | 6 |
| 2.2 Vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä | 8 |
| 2.2.1 Patteriverkoston toiminta | 8 |
| 2.2.2 Järjestelmän perussäätö | 11 |
| 2.3 Lämmityksen säätö | 11 |
| 2.3.1 Säädön kriteerit ja perinteiset tavat | 11 |
| 2.3.2 Uudet menetelmät säädössä | 14 |
| 2.3.3 Sään vaikutus ja ennakointi | 19 |
| 3 Data-analyysi | 22 |
| 3.1 Sisälämpötila-analyysi useissa kohteissa | 22 |
| 3.1.1 Kohteiden ja menetelmien kuvaus | 22 |
| 3.1.2 Datan tarkastelu | 22 |
| 3.1.3 Tarkastelun johtopäätökset | 41 |
| 3.2 Patteriverkoston ja sisälämpötilojen analysointi Vantaan konttorilla | 43 |
| 3.2.1 Kohteen, järjestelmän ja menetelmien kuvaus | 43 |
| 3.2.2 Datan tarkastelu | 48 |
| 3.2.3 Tarkastelun johtopäätökset | 68 |
| 4 Ratkaisumahdollisuudet | 71 |
| 4.1 OTC | 71 |
| 4.2 Sääennustepohjainen malli | 73 |
| 4.3 Tilakonepohjainen rakennuksen lämmityksen mallintaminen | 77 |
| 4.3.1 Ratkaisun esittely | 77 |
| 4.3.2 Ratkaisun potentiaalin analysointi ja jatkokehitysideat | 79 |
| 4.4 Fysikaalisperusteinen rakennuksen lämmityksen säätötapa | 80 |
| 4.4.1 Ratkaisun esittely | 80 |
| 4.4.2 Ratkaisun potentiaalin analysointi | 83 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 5 Yhteenveto ja johtopäätökset | 84 |
| Viitteet | 88 |

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

| | |
|--------|--|
| ϕ | teho, W |
| η | hyötysuhde, - |
| ρ | tiheys, kg/m ³ |
| A | ala, m ² |
| c | ominaislämpökapasiteetti, kJ/kgK |
| C | lämpökapasiteetti, J/K |
| h | ominaislämpökapasiteetti, J/(m ² K) |
| q | virtaama, kJ/kgK |
| q_C | konvektiolämpökuormat, J |
| $q(t)$ | lämpöteho, W |
| R^2 | selitysaste, % |
| T | lämpötila, °C |
| u | lämpötila, K |
| V | tilavuus, m ³ |

Lyhenteet

| | |
|------|--|
| DDC | suora digitaalinen säätö (direct digital control) |
| HVAC | talotekniikka (heating, ventilation and air conditioning) |
| LTO | lämmöntalteenotto |
| LVI | lämpö, vesi ja ilma |
| MPC | mallipohjainen ennakoiva säätö (model predictive control) |
| PID | suhde, integroiva ja derivoiva (proportional, integral and derivative) |

1 Johdanto

Rakennusten lämmitys, rakennuksissa käytetty huoneisto- ja kiinteistösähkö, rakennustarvikkeiden valmistus ja rakentaminen kattavat noin 40 % koko Suomen loppuenergiankäytöstä [4]. Energiankulutuksen vähennys voidaan tehdä niin kuluttajatasolla kuin uusien tekniikoiden kehitystyöllä [14]. Kehitystyössä talotekniikkajärjestelmien tarpeenmukaisella säädöllä ja ohjauksella edistetään rakennuksen energiansäästöä [24] ja uusilla tekniikoilla pyritäänkin säästämään energiaa viihtyvyyden laskematta. Rakennuksen lämmityksen tavoitteena on siis ylläpitää hyviä lämpöoloja sekä viihtyvyyden että terveyden kannalta [29]. Mukavuutta ja taloudellisuutta voidaanakin pitää rakennuksen lämmityksen säädön onnistumisen tärkeimpinä kriteereinä [24]. Perinteisesti tavoitteita on pyritty toteuttamaan toimenpiteiden aikatauluttamisella ja asetusarvojen muutoksilla. Aikatauluttamiseen sisältyy tilan käyttöaikojen arviointi ja sen mukaan järjestelmän käynnissäpito [28].

Rakennussektorilla yleisesti älykkäiden ja oppivien menetelmien soveltaminen on ollut vielä harvinaista, vaikka monilla muilla tekniikan alueilla käyttö on ollut menestyksestä [24]. Yleisin takaisinkytketty säätötapa rakennusautomaatiojärjestelmissä on vieläkin siis PID [28]. Yksittäisiä älykkäitä sovelluksia löytyy kuitenkin myös rakennusautomaation piiristä [24] ja tiedeyhteisö onkin ollut innokas korvaamaan PID-säätimet rakennusten järjestelmissä sumeaa logiikkaa, neuroverkkoja ja prosessimalleja hyödyntävillä säätimillä [28]. Lisäksi nykyisissä älykkäissä säätötaivoissa hyödynnetään esimerkiksi itsevirittyviä ja adaptiivisia menetelmiä [24].

Usein lämmityksen, ilmanvaihdon ja ilmastoinnin huono toimivuus johtuu perinteisten säätöjärjestelmien kyvyttömyydestä käsitellä epälineaarisuuksia ja mukautua pitkän aikavälin muutoksiin [8]. Rakennuksen terminen käyttäytyminen on kokonaisuudessaan epälineaarista myös vaihtelevien lämpökuormien ja käyttäjien käytöksen takia [19]. Neuroverkkoja hyödynnetään yleisesti juurikin epälineaarisuusongelmien ratkaisemisessa ja siksi neuroverkkoja käytetään enenevässä määrin rakennusautomaatiojärjestelmissä [8]. Myöskään ihmisen päätöksentekoprosessia matkivat sumean logiikan säätimet eivät ole yhtä herkkiä epälineaarisuuksille kuin esimerkiksi perinteiset PID-säätimet [24]. Taloteknisissä sovelluksissa sumeaa logiikkaa käytetään erityisesti lämmityksen säädön ongelmissa [17].

Sisälämpötila seuraa lämmitystehossa tapahtuvia muutoksia tietyllä viiveellä rakennuksen suuren lämpökapasiteetin takia. Positiivisia seurauksia tästä ovat sisälämpötilan vakaus ja rakenteisiin varastoituva ilmaislämpö. Haittana ovat vaikeudet reagoida nopeasti muutoksiin [29]. Ongelmana perinteisessä asetusarvokäyräperusteisessa säädössä onkin, että rakenteisiin varautunut lämpö vääristää olosuhteita ulkolämpötilan vaihdellessa [34]. Nykyisissä energianhallintateknologioissa on haasteena, että ne ovat ainoastaan reaktiivisia ja pystyvät näin ollen toimimaan vain nykyinformaation valossa [38].

Uudet ennakoivat menetelmät auttavat rakennusautomaatiojärjestelmää hyödyntämään useampia osiaan systemaattisesti, ennustamaan tulevia kustannuksia, ennakoimaan sähkönkulutusta ja nostamaan takaisinkytketyn säätöpiirin robustisuutta [38]. Ennustavan säädön suurin hyöty onkin lämmönjakelujärjestelmän sopeuttaminen etukäteen lämmöntarpeen ennusteen mukaan [16]. Sääennusteita käytetään

tetään rakennusautomaatiojärjestelmissä useilla tavoilla. Korkeammalla päätöksen-tekotasolla sääennusteiden avulla arvioidaan ekonomisia suureita kuten energiankulutusta. Lähimpänä järjestelmätasoa ennusteilla voidaan arvioida yksittäisiä suureita, kuten tuulen nopeutta tai auringon säteilyä [37].

Työn tarkoituksena on tutkia rakennusten lämpökuormia ja -käyttäytymistä ensin teoreettisesti ja tavoitteena on ymmärtää ilmiöitä ja niiden taustoja. Käytännöntasolla tarkoituksena on analysoida oikeiden kohteiden sisälämpötilan käyttäytymistä ja tavoitteena on löytää trendejä, joiden pohjalta käytöstä voidaan ymmärtää laajemmin. Lisäksi tarkoituksena on tutkia patteriverkoston toimintaa ja analysoida sen toimivuutta. Tavoitteena on patteriverkoston säädön parantaminen. Työn tarkoituksena on myös tutkia ennakoivaa ja sääennustepohjaista säätöä, minkä tavoitteena on kartoittaa olemassa olevia tekniikoita ja analysoida niiden toimivuutta niin teoreettisesti kuin käytännön kohteissakin.

Luvussa 2 esitellään rakennuksen lämmitykseen ja säätöön kokonaisuudessaan liittyvää aikaisempaa tutkimusta. Luku 2.1 keskittyy yleisesti rakennusten lämmitykseen. Siinä käydään läpi lämpötaseeseen vaikuttavat seikat sekä laskentatavat. Lisäksi luvussa esitellään yleisimmät lämmitystavat ja lämmitysenergian kulutuksen tutkimusta. Lämmönjakelussa yleisimmät järjestelmät ovat vesikiertoisia [29], joten luku 2.2 keskittyy patteriverkostojen toimintaan. Viimeisin alaluku 2.3 pureutuu lopulta sekä nykyisen että uuden sukupolven lämmityksen säätöratkaisuihin sekä sääolojen ja -ennusteiden hyödyntämiseen.

Luvussa 3 analysoidaan kohteista kerätyn datan perusteella sisälämpötilan käyttäytymistä. Luku 3.1 keskittyy viiden kohteen sisälämpötiloihin ja kuormiin. Luvussa 3.2 taas nostetaan erityiseksi esimerkiksi Schneider Electricin Vantaan konttori ja sen automaatiojärjestelmän toimivuutta tarkastellaan perusteellisesti. Lisäksi Vantaan konttorin patteriverkostoa analysoidaan tarkemmin ja tutkitaan tehoperusteisen säädön hyötyjä verrattuna menoveden lämpötilan säätöön.

Lopulta luvussa 4 otetaan lähempään tarkasteluun neljä erilaista valmista menetelmää rakennusten lämmityksen säätöön. Kaksi menetelmistä luvuissa 4.1 ja 4.2 ovat Schneider Electricin omia, yksi luvussa 4.3 on Aalto-yliopistossa ja VTT:ssä kehitetty tilakonepohjainen menetelmä ja viimeinen luvussa 4.4 on Ruotsin ilmatieteenlaitoksen fysikaalisperusteinen menetelmä. Näiden menetelmien tuloksia tarkastellaan joko verraten olemassa olevien kohteiden mittausdataan tai kirjallisuuden pohjalta. Lisäksi pohditaan kaikkien menetelmien toimivuutta ja niiden jatkokehityksen mahdollisuuksia.

2 Aikaisempi tutkimus

Tässä luvussa tehdään katsaus aiheen aiempaan tutkimukseen. Luvussa 2.1 käsitellään rakennuksen lämpötasetta, yleisimpiä lämmitystapoja ja rakennusten energiankulutusta. Luvussa 2.2 paneudutaan patterilämmitykseen ja -verkostoihin. Viimeiseksi luvussa 2.3 kerrotaan lämmityksen perinteisestä säädöstä ja tulevaisuuden menetelmistä. Lisäksi luvussa käsitellään sään ja sääennusteiden käyttöä.

2.1 Rakennuksen lämmitys

Tämä luku esittelee alaluvussaan 2.1.1 rakennuksen lämpötaseen sekä siihen vaikuttavat seikat ja niiden laskentatavat. Lisäksi alaluvussa 2.1.2 käydään läpi yleisimmät lämmitystavat ja -tekniikat. Lopulta paneudutaan alaluvussa 2.1.3 rakennuksen kuluttaman energian määrään ja sen vähentämiseen sekä tapoihin hyödyntää ilmaisen energiaa.

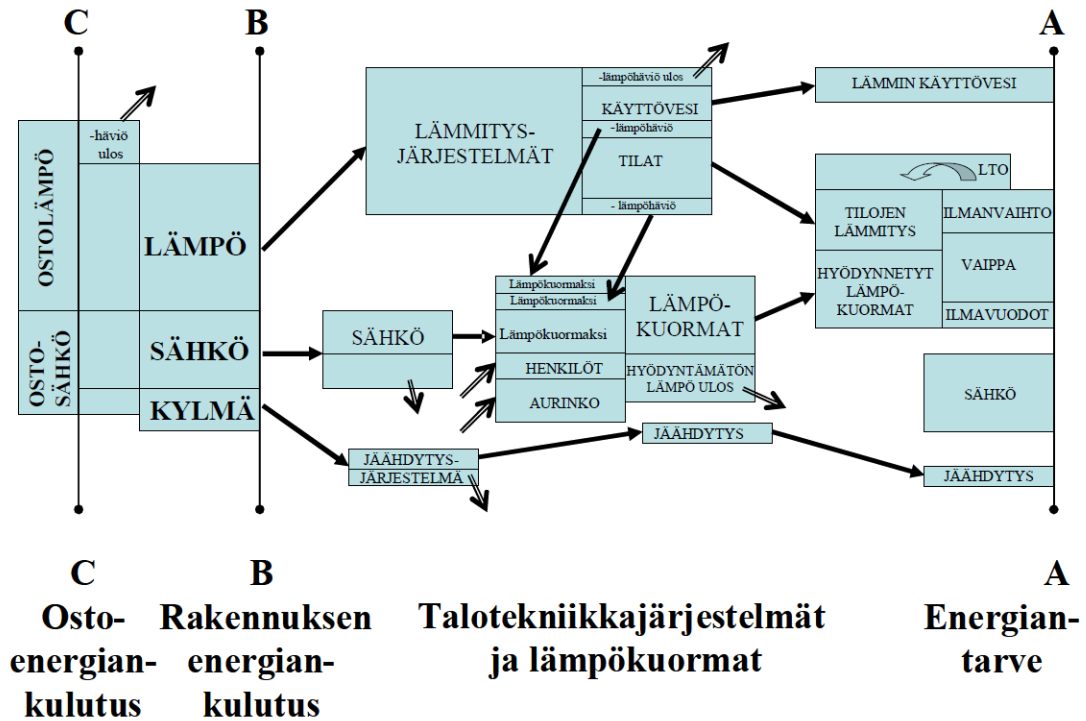
2.1.1 Lämpötase

Ohjeet rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskentaan on esitetty Suomen rakentamismääräyskokoelmassa D5. Laskentamenetelmässä käytetään rakennuksen energiatasetta, joka on esitetty kuvassa 1. Tase sisältää lämmitys-, sähkö- ja jäähdytysenergiatasetta sekä näiden vaikutukset toisiinsa. Rakennuksen energiantarve koostuu tilojen ja käyttöveden lämmitys-, sähköenergian- ja jäähdytystarpeesta. Koko energiatarve katetaan järjestelmien siirtämällä lämpö-, sähkö- ja jäähdytysenergialla sekä ilmaisen energioilla kuten auringon säteilyenergialla. [36]

Kuvassa 2 esitetään rakennuksen lämmön kehitys ja kulutus. Vasemmalta lähtien kuva esittää lämmöntuotannon kulutuksen ja rakennuksen energian kokonaiskulutuksen. Keskellä punaisella näkyy lämmönkehitys kokonaisenergiankulutuksesta. Oikealla harmaalla kuvataan lämmön tarvetta ja kulutusta. Pääasiassa rakennuksen lämmitystehontarve riippuu rakenteiden johtumislämpöhäviöistä, ilmapuodoista ja ilmanvaihdosta. Koko rakennuksen lämmitystehontarve saadaan huonekohtaisten lämmitystehontarpeiden summana, johon lisätään mahdollinen tuloilman lämmitystehontarve sekä lämpimän käyttöveden lämmityksen tehontarve. Lämmitystehontarpeen muodostuminen on esitetty yhtälöissä 1 ja 2. Lämmitystehontarpeen mitoituksessa sisäisten lämmönlähteiden vaikutus on melko vähäinen ja ne otetaan huomioon nykyisissä laskutavoissa vain kun ne ovat todella huomattavia ja jatkuvia. Nykyisissä menetelmissä ei myöskään juuri huomioida auringon säteilylämpötilaa tai rakennusten rakenteiden lämpökapasiteettia. [36]

$$\phi_{\text{lämmitys}} = \frac{\phi_{\text{huonelämmitys}}}{\eta_{\text{huonelämmitys}}} + \frac{\phi_{\text{tuloilmapatteri}}}{\eta_{\text{tuloilma}}} + \frac{\phi_{\text{lämminkäyttövesi}}}{\eta_{\text{lämminkäyttövesi}}}, \quad (1)$$

jossa



Kuva 1: Rakennuksen energiatase [36]

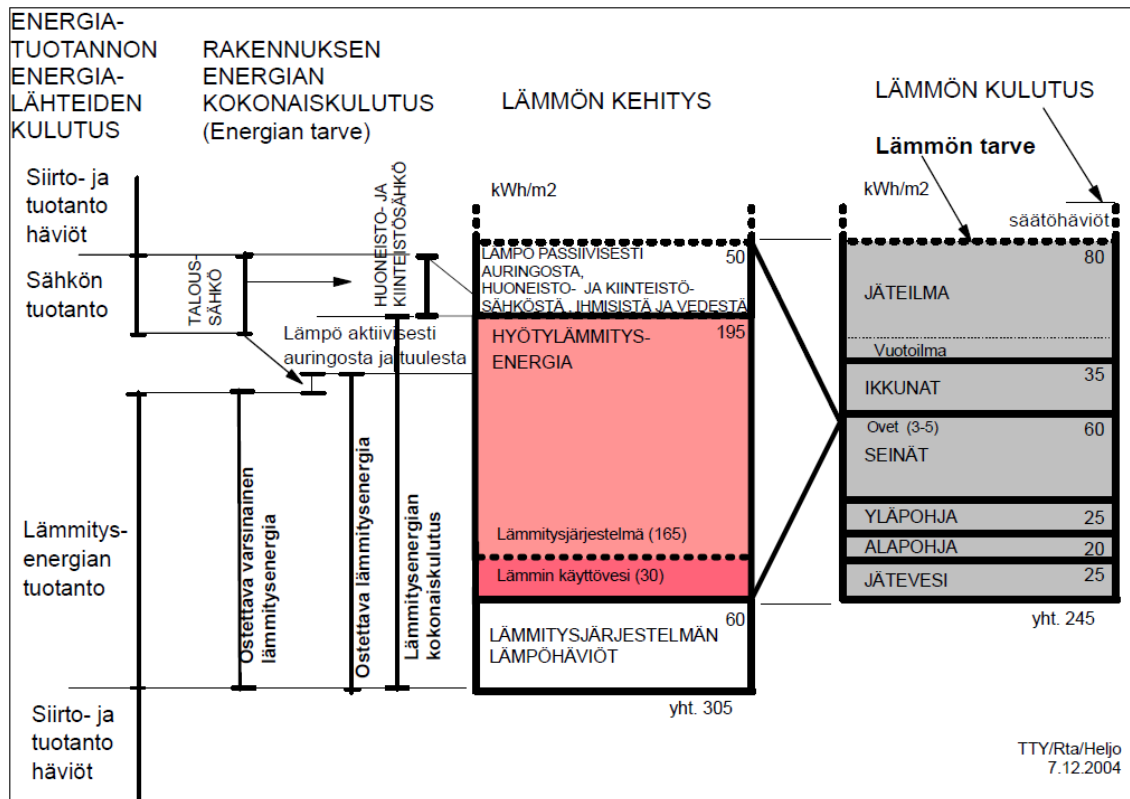
| | |
|----------------------------------|---|
| $\phi_{\text{lämmitys}}$ | rakennuksen lämmitystehontarve, W |
| $\phi_{\text{huonelämmitys}}$ | huonelämmityksen tehontarve, W |
| $\phi_{\text{tuloilmapatteri}}$ | ilmanvaihdon tuloilman jälkilämmityspatterin tehontarve, W |
| $\phi_{\text{lämminkäyttövesi}}$ | käyttöveden lämmitystehontarve, W |
| $\eta_{\text{huonelämmitys}}$ | huonelämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa |
| η_{tuloilma} | ilmanvaihdon tuloilman lämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa |
| $\eta_{\text{lämminkäyttövesi}}$ | käyttöveden lämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa |

$$\phi_{\text{huonelämmitys}} = \phi_{\text{johtuminen}} + \phi_{\text{vuotoilma}} + \phi_{\text{ilmanvaihto}} - \phi_{\text{tuloilmapatteri}}, \quad (2)$$

jossa

| | |
|---------------------------------|---|
| $\phi_{\text{huonelämmitys}}$ | huonelämmityksen tehontarve, W |
| $\phi_{\text{johtuminen}}$ | tilojen johtumisteho, W |
| $\phi_{\text{vuotoilma}}$ | vuotoilman lämmitysteho tilassa, W |
| $\phi_{\text{ilmanvaihto}}$ | ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema teho, W |
| $\phi_{\text{tuloilmapatteri}}$ | tuloilman jälkilämmityspatterin tehontarve, W |

Yksittäisen tehontarpeen määrittely tapahtuu kyseisen osa-alueen ominaislämpöhäviön ja lämpötilojen erotuksen tulona. Tarkasti laskennat esitellään Suomen rakentamismääräyskokoelma D5:ssä. [36]



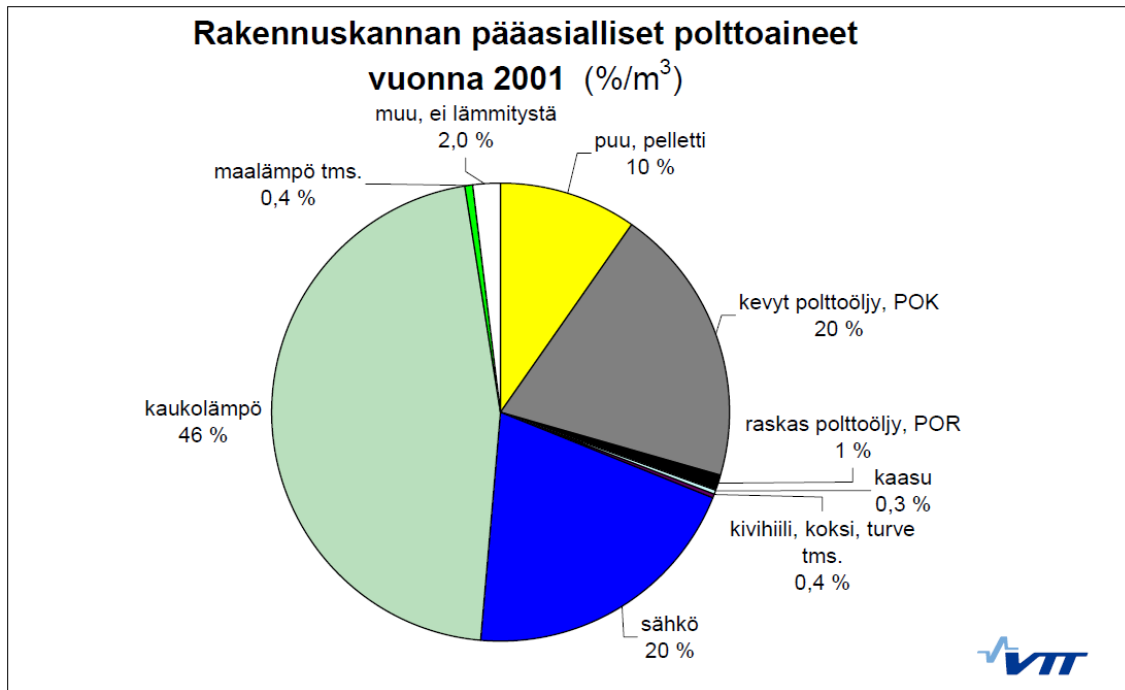
Kuva 2: Rakennuksen lämmön kehitys ja kulutus [7]

2.1.2 Lämmitystarve ja -tavat

Rakennuksen lämmityksen tavoitteena on ylläpitää hyviä lämpöoloja sekä viihtyisyyden että terveyden kannalta. Tavoitteet pyritään saavuttamaan mitoittamalla lämmitysjärjestelmä lämmitystarpeen perusteella. Lämmitystarpeeseen vaikuttavat rakennus- ja ilmanvaihtotekniikka, sääolot ja tavoitelämpötilat. Lämmöntarve määritellään joko laskemalla tai arvioimalla ensimmäisenä järjestelmän suunnittelussa ja sen perusteella tehdään laitesuunnittelu ja -mitoitus. Lämmöntarve määritetään aluksi huonekohtaisesti, jonka jälkeen määrittely laajennetaan rakennuskohtaiseksi [29]. Lämmityslaitteilla lämmitetään rakennuksen tilojen lisäksi myös käyttövesi ja ilmanvaihdon tuloilma. Lämmitysjärjestelmää valittaessa tulee ottaa huomioon rakennuksen koko, käyttötarkoitus, sijainti ja energiantarve [12].

Tavallisimmat lämmöntuotantotavat rakennuksissa ovat kauko-, öljy- ja sähkölämmitys sekä kotimaisten kiinteiden polttoaineiden käyttö [29]. Lisäksi käytetään maakaasulämmitystä, ulkomaisia kiinteitä polttoaineita, erilaisia lämpöpumppuja sekä aurinkolämmitystä [12]. Näistä esimerkiksi aurinkolämmityksen merkitys on Suomessa vähäinen ja sitä hyödynnetään lähinnä muun lämmitysenergian tarvetta vähentävänä tekijänä [29]. Lämmöntuotantotavoista selkeästi yleisin on kaukolämmitys, jota käytetään lähes puolessa rakennuskannasta. Sekä kauko- että sähkölämmityksen osuudet ovat kasvamassa, kun öljylämmityksen osuus on selkeästi laskussa

[7]. Kuvasta 3 käy ilmi vuoden 2001 lämmöntuotantotapojen suhde.



Kuva 3: Suomen rakennuskannan pääasialliset polttoaineet vuonna 2001 [7]

Vesikiertoiset järjestelmät ovat lämmönjakelussa yleisimmät [29]. Suuret kiinteistöt lämmitetään lähes aina vesikiertoisesti, ja pientaloissakin tapa on erittäin yleinen. Lämmönlähteenä käytetään molemmissa tapauksissa melkein aina kaukolämpöä tai talon omaa lämmityskattilaa [34]. Vesikiertoisten järjestelmien lisäksi tavanomaisia ovat ilma- ja sähkölämmitysjärjestelmät. Matalapaineiset höyrylämmitysjärjestelmät alkavat nyttemmin olla harvinaisia [29]. Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmä sopii erityisesti matalaenergiarakennuksiin niiden pienen lämmöntarpeen vuoksi. Tällöin erillisen lämmitysjärjestelmän rakentaminen hallitun tulo- ja poistoilmanvaihdon lisäksi on kyseenalaista ja ilmanvaihtojärjestelmään voidaan yhdistää lämmittävä tuloilman päätelaite. Ilmanvaihtokoneen lämmityspatteri on tyypillisesti vesikiertoinen kun taas päätelaitteet sähkölämmitteisiä [27]. Keskuslämmitysjärjestelmä on Suomessa vallitsevin tapa lämmittää. Lämmönlähteenä keskuslämmitykselle voi toimia kaukolämpö, kattilalaitos tai sähkölämmitys. Keskuslämmityksen lisäksi hyödynnetään usein huonekohtaisesti erilaisia kamiinoita, uuneja, takkoja ja sähkölämmittimiä [29].

2.1.3 Energiankulutus

Rakennusten lämmitys, rakennuksissa käytetty huoneisto- ja kiinteistösähkö, rakennustarvikkeiden valmistus ja rakentaminen kattavat noin 40 % koko Suomen loppuenergiankäytöstä [4]. Rakennusten lämmitysenergian käyttö on laskenut puoleen viimeisen 30 vuoden aikana paremman eristystason ja lisääntyneen rivi- ja kerrostaloa-

sumisen ansiosta [9]. Kuitenkin asuin- ja palvelurakennusten lämmityksen osuus kaikesta loppuenergiankäytöstä energiatilastojen mukaan oli vuonna 2003 22 %. Osuus kasvaa koko ajan, koska rakennuskannan koon kasvu ja laatutason nosto lisäävät energiankulutusta jatkuvasti enemmän kuin mitä säästötoimenpiteet tai energiatehokas uudisrakentaminen poistuvan rakennuskannan tilalle vähentävät [7]. Kiinteistöjen korjaustoiminnassakaan ei toteudu kaikki laskennallinen energiansäästö, sillä laatutason nosto lisää erityisesti sähkönkulutusta ilmanvaihdossa, valaistuksessa ja erilaisissa sähkölaitteissa [5]. Sähkönkulutus onkin viisinkertaistunut 30 vuoden aikana sekä kotitalouksissa että palvelusektorilla [9].

Pohjan tehokkaalle energianhallinnalle luo riittävä tila- ja käyttäjäkohtainen mittarointi [4]. Energiankulutuksen seurannassa tarkastellaan kiinteistön lämmön-, sähkön- ja vedenkulutusta ja verrataan näitä kuukausitasolle määriteltuihin tavoitearvoihin. Vertaamalla toteutunutta kulutusta tavoitekulutukseen voidaan havaita kiinteistön käyttötavoista, laitetekniikasta ja rakenteellisista ominaisuuksista johtuvat poikkeamat. Järjestelmällisellä kulutusseurannalla ja energianhallinnalla pyritään pitkällä tähtäimellä vaikuttamaan energiansäästöinvestointeihin ja käyttökilöistön koulutukseen. Lyhyellä tähtäimellä pyritään tunnistamaan käyttötekniisiä virheitä ja selvittämään laite- ja järjestelmävikoja. Normaali kulutustaso kiinteistöille määritellään energiankulutuksen tavoitearvoilla, jotka lasketaan kiinteistön fyysikaalisten ominaisuuksien ja käyttötapojen perusteella [25].

Rakennuksen energiankulutukseen vaikuttaa merkittävästi rakennuksen käyttö ja yhdyskuntarakenne [4]. Lisäksi vaikuttavia seikkoja ovat rakennuksen tilaohjelma, koko, suunnitteluratkaisut, rakenteet, talotekniset järjestelmät, tilojen käyttöajat, tekninen varustetaso, käyttäjien lukumäärä, käyttötottumukset ja sijainti [9]. Nyt käytössä olevien palvelurakennusten lämmön ja polttoaineiden kulutukseksi vuonna 2020 on arvioitu noin 22000 GWh ja sähkönkulutukseksi noin 11000 GWh. Tällöin säästöpotentiaali olisi lämmön ja polttoaineiden osalta noin 1350 GWh ja sähkön noin 300 GWh. Asuinrakennuksista ei ollut saatavilla tarvittavia seurantatietoja, joten niiden säästöarvioissa käytetään samoja prosentteja kuin palvelurakennusten. Tämä tarkoittaa lämmön ja polttoaineiden kulutukseksi 12000 GWh (säästöä 720 GWh) ja sähkönkulutukseksi 2160 GWh (säästöä 65 GWh) [5].

Huoneisto- ja kiinteistösähkön käyttö on kasvanut viime vuosikymmenien aikana rakennuksissa monikertaiseksi [4]. Kuitenkin tulevaisuuden rakennuksissa sähkökuormista voidaan hyödyntää lämmityksessä vain pieni osa, sillä huomattavan osan vuodesta kuormat ovat suuremmat kuin lämpöhäviöt rakennusten hyvien eristysominaisuuksien vuoksi. Rakennuksen kuluttamaa sähkötehoa voidaankin tutkimuksen perusteella hyödyntää toimistorakennuksen lämmitystehon mitoituksessa enimmillään 6 %. Asuinrakennuksessa sähkökuormataso on pienempi ja näin ollen hyödynnettävyyskin. Toimisto- ja asuinrakennuksissa kuormitustaso myös painottuu eri tavalla vuorokauden aikana. Kun toimistoissa kuorma jakautuu tasaisesti päivän tunneille, asuinrakennuksissa kuorma painottuu illalle ja hieman aamuun. Kokonaissähkönkulutus sisältää myös komponentteja, jotka eivät ole hyödynnettävissä lämmityksessä. Tästä syystä ei rakennuksen kokonaissähkönkulutusta voida verrata suoraan lämmitysenergian tarpeeseen, vaikka voidaan olettaa valaistuksen sekä käytölaitteiden sähköenergian muuttuvan kokonaan hyödynnettäväksi lämpöenergiaksi.

Siis vaikka sähkökuormien ilmaisen energiaa pystytään hyödyntämään, ei lämmitystehon mitoitusarvoja voida merkittävästi pienentää, koska kuormat ja huipputeho ovat käytännössä aina eriaikaisia [30].

Olemassa olevien rakennusten energiankulutusta voidaan pienentää käyttämällä energiatehokkaita lämmitysjärjestelmiä ja sähkölaitteita, parantamalla rakenteiden lämmöneristystä ja ilmatiiveyttä sekä tehostamalla lämmön talteenottoa [9]. Kiinteistöjen energiankulutukseen voidaan vaikuttaa 5 – 20 % järjestelmien ja laitteiden tarkoituksenmukaisella käytöllä sekä tilojen käyttäjien käyttäytymistavoilla [4]. Uusien rakennusten lämmitysenergiankulutusta voidaan pienentää alle puoleen nykyisestä hyödyntämällä matalaenergiateknologioita kuten tehokkaampia lämmöneristeitä [27]. Lisäksi alentamalla huonelämpötilaa yhdellä asteella voidaan säästää 5 % lämmityskuluissa [22]. Yleisimmät yksinkertaiset toimenpiteet lämmitysenergian säästämiseen ovat ikkunoiden ja parvekeovien tiivistäminen, ilmanvaihdon säätäminen tiiviimpien ikkunoiden mukaan, patteriverkoston puhdistus ja tasapainotus, kaukolämmön tilaustehon tarkistus, termostaattisten patteriventtiilien asentaminen sekä lämmönjako- ja kattilahuoneen kuluttajalaitteiden uusiminen [22]. Taloteknisistä toimenpiteistä kannattavimpia pientaloissa ovat käsisäätöisten patteriventtiilien vaihtaminen termostaattisiksi ja elinkaaren lopussa olevan öljykeskuslämmityksen uusiminen [9].

Uudis- ja korjausrakentamisessa voidaan muista tavoitteista tinkimättä vaikuttaa yhtenä laatukriteerinä rakennusten energiatehokkuuteen. Rakennusten käyttämän energian määrään voidaan vaikuttaa merkittävästi asettamalla energiatehokkuudelle vaatimukset rakennuksen suunnittelussa ja toteuttamalla rakentaminen suunnitellun mukaisesti [4]. Energiatehokkuuteen tehtävät investoinnit vaikuttavat erityisesti suomalaiseen teollisuuteen ja rakennustoimintaan, joten korjauksiin sitoutuva pääoma kasvattaa Suomen bruttokansantuotetta ja vähentää ulkomailta ostettavan energian määrää [9]. Energiansäästöissä tulee aina ottaa huomioon turvallisuus ja terveys. Oikein suunnitellut energiansäästötoimet parantavat asumis- ja työskentelyolosuhteita sekä ehkäisevät osaltaan kosteusvaurioita ja homeongelmia rakennuksissa [4]. Lämmitystavasta riippumatta lämmitys aiheuttaa myös aina ympäristöhaittoja. On olennaista, että lämmittäminen järjestetään niin, ettei energiaa kuluteta tarpeettomasti [12].

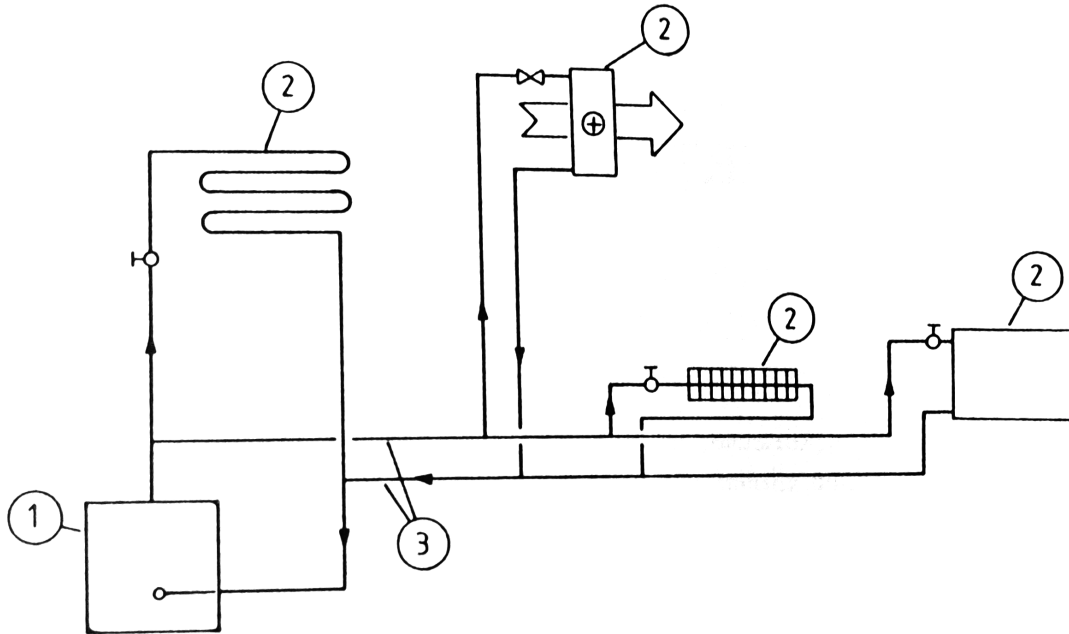
2.2 Vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä

Tämä luku käsittelee tarkemmin vesikiertoisia lämmitysjärjestelmiä eli patteriverkostoja, koska yleisimmät järjestelmät lämmönjakelussa ovat vesikiertoisia [29]. Alaluku 2.2.1 esittelee patteriverkoston toimintaa ja alaluku 2.2.2 taas niiden säätöä.

2.2.1 Patteriverkoston toiminta

Keskuslämmityksessä lämpöä siirtävänä väliaineena käytetään vettä, höyryä tai ilmaa. Vesi on näistä ehdottomasti yleisin hyvän siirtokykynsä ansiosta. Nykyään lämmitysverkoston veden virtaus saadaan aikaan kiertovesipumpun avulla, mutta ennen pumppujen yleistymistä hyödynnettiin veden lämpötilaeroista johtuvien tiheysero-

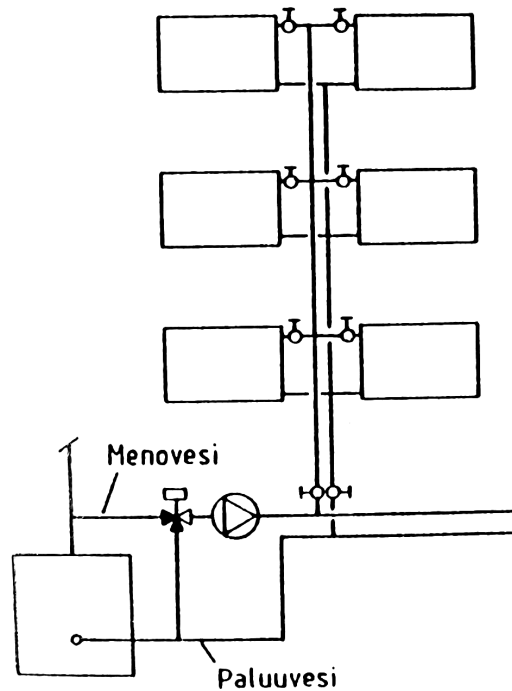
jen aikaansaamaa kiertovoimaa. Huoneisiin lämpö siirretään verkostosta yleisimmin pattereilla, mutta myös lattialämmitystä ja kattolämmitystä käytetään. Kuvassa 4 havainnollistetaan vesikiertoisen keskuslämmitysjärjestelmän toimintaa. [29]



Kuva 4: Vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän peruseriaate, jossa 1 on lämmönlähde, 2 ovat lämmönluovuttimia ja 3 on lämmönsiirtoverkko [29]

Yleisimmät menetelmät lämmönluovuttimien kytkemiseen lämmönsiirtoverkkoon ovat kaksiputki- ja yksiputkikytkennät, käännetty paluu sekä jakotukkijärjestelmä. Näistä eniten käytetty on kaksiputkijärjestelmä ja siinä lämmönluovuttimet kytetään rinnan. Kaksiputkijärjestelmä on esitetty kuvassa 5. Järjestelmässä kaikkiin lämmönluovuttimiin johdetaan samanlämpöistä menovettä ja mitoitusilanteessa myös paluuedet lämmönluovuttimilta ovat keskenään samanlämpöisiä. Päällekkäin sijaitsevien huoneiden patterit kytetään yhteisiin nousulinjoihin ja nousulinjat taas liitetään kellaritiloissa sijaitseviin vaakasuuntaisiin runkolinjoihin. Verkon tasapainon kannalta on olennaista, että jokaiseen patteriin saadaan mitoitusilannetta vastaava vesivirta. Koska lämmönjakokeskuksesta pattereihin kulkevan vesivirran reitti vaihtelee patterin sijainnin mukaan, vaihtelee myös virtausreitin vastus. Tällöin varustetaan verkosto säätöventtiileillä, joilla säädetään painehäviö ja tasataan virtaus. Tärkeimmät venttiilit ovat kunkin patterin yhteydessä olevat patteriventtiilit sekä linjan alussa sijaitsevat linjasäätöventtiilit. [29]

Kun lämmönluovuttimet kytetään sarjaan, on kyseessä yksiputkijärjestelmä. Sen oleellinen ero kaksiputkijärjestelmään verrattuna on pattereiden meno- ja paluuesien lämpötilan vaihtelu patterin sijainnista riippuen. Koska vesien lämpötila vaihtelee, vaihtelee myös patterien keskilämpötila. Mitä alempi patterin lämpötila on, sitä suurempi pinta-ala tarvitaan lämmönluovuttimelle saman lämmönluovu-



Kuva 5: Kaksiputkijärjestelmän kytkentäperiaate [29]

tustehon saamiseksi. Käännetyn paluun -menetelmä on kaksiputkijärjestelmä, jossa jokaisen patterin kiertopiiri on yhtä pitkä. Tällä on pyritty helpottamaan perinteisen kaksiputkijärjestelmän vaikeutta jakaa vesivirtoja oikein pattereille, mutta usein putkien koko ja määrä kasvaa epätaloudellisen suureksi. Jakotukijärjestelmällä yritetään poistaa tasapainotus- ja asennusteknisiä ongelmia. Lähinnä pientaloihin ja asuinkerrostaloihin tarkoitetulla järjestelmällä kytketään saman huoneiston patterit pääverkostoon keskitetyllä jakotukilla, jonka yhteyteen asennetaan helpon käytettävyyden takia myös säätöventtiilit, mittalaitteet ja muut toiminnot. [29]

Pienissä ja yksinkertaisissa verkostoissa säädetään vesivirrat ja tasataan paineerot linjasäätöventtiileillä ja esisäädettävillä, termostaattisilla patteriventtiileillä. Laajoissa verkostoissa käytetään virtausteknisen vakauden saavuttamiseksi ja ääniongelmien estämiseksi linjasäätö- ja patteriventtiilien yhteydessä vyöhykekohtaista, keskitettyä tai linjakohtaista painesäätöä. Keskitetty painesäätö vaatii putkistolta pientä painehäviötä toimiakseen. Tällöin verkon stabiilius voidaan toteuttaa yhdellä paine-erosäätimellä eikä linjakohtaista painesäätöä tarvita. Paine-erosäädin muuttaa omaa painehäviötään automaattisesti ja rajoittaa näin verkoston paineen nousemisen yli asetetun arvon. Jos putkiston painehäviö on suuri, voidaan verkoston stabiilius varmistaa ainoastaan linjakohtaisella painesäädöllä [10]. Venttiileillä ja säätimillä tasapainotetaan verkosto vaikeinta kiertopiiriä vastaavaksi. Lisäksi jokainen säädettävä linja varustetaan sulullisilla mittausyhteillä, joilla voidaan mitata virtaama [11].

Patterin lämmönluovutusta säädetään joko menoveden lämpötilan tai patterin kautta kulkevan vesivirran muutoksilla. Huonelämpötilojen tasaaminen perustuu patterin läpi kulkevan vesimäärän säätämiseen patteriventtiilin avulla [29]. Vesikierroisessa patterilämmityksessä käytetään matalia lämpötiloja, jolloin energiahäviöt ovat pienet ja pattereiden pintalämpötilat pysyvät turvallisina. Meno- ja paluulämpötilat verkostossa valitaan lämmönlähteen ja lämmönjakotavan perusteella [11].

2.2.2 Järjestelmän perussäätö

Lämmitysverkoston perussäädöllä tarkoitetaan patteriverkoston virittämistä tai konfigurointia toimimaan suunnitelmien mukaisesti. Perussäädöllä varmistetaan, että huoneistoissa on suunnitelmien mukainen lämpötila [21]. Huonelämpötilan ylläpidon ansiosta viihtyvyys on korkea ja energiatalous hyvä, koska yllälämmittämistä ei tapahdu. Alustava perussäätö eli vesivirtojen säätö on tehtävä ennen rakennuksen vastaanottamista, kun taas varsinainen perussäätö eli lämpötilojen hienosäätö tehdään lämmityskaudella ennen vuositakuutarkastusta [10]. Patteriverkoston mitoitus tehdään laskennallisen huippulämmitystehon perusteella ja toiminnassa lämmitystehoa säädetään lämmitystarpeen perusteella muuntelemalla menoveden lämpötilaa. Lämmöntarve riippuu suurimmassa osassa tapauksista pääosin ulkolämpötilasta, jonka mukaan säätö tehdään [29].

Lämmitysjärjestelmän moitteettoman toiminnan takaa asiantunteva suunnittelu, toteutus ja säätö sekä säännöllinen huolto [10]. Lämmityslaitoksen energiatalouden kannalta on tärkeää, että patteriverkosto on perussäädetty vastaamaan huoneiden lämmöntarvetta. Perussäätö on välttämätöntä, koska patterimitoitus on aina käytännössä epätarkka ja laskelmissa ei välttämättä ole käytetty oikeita parametreja rakenteiden eristykselle. Perussäätö tehdään kuitenkin usein huolimattomasti ajan, rahan tai taitojen puutteen vuoksi ja tämä aiheuttaa lämmityslaitoksen epätasapainon, joka johtaa menoveden lämpötilan säätöön kylmimpien huoneiden perusteella ja näin ollen yllälämpöön lopuissa huoneissa [29]. Perussäädön onnistumisen tärkeimpiä edellytyksiä on perusteellinen kuntotutkimus, jossa tarkastetaan rakennuksen ja järjestelmien tilanne energiataloudelliselta kannalta. Tutkimuksessa selvitetään kunto- ja toimintaedellytykset mm. lämmitysverkostolle, pumpuille, lämmöntuotantolaitteille sekä patteri- ja linjasäätöventtiileille. Lisäksi kuntotutkimuksessa tarkastetaan ilmanvaihdon toiminta ja rakennuksen ulkovaipan lämmöneristyskyky [10].

2.3 Lämmityksen säätö

Luku käsittelee rakennusten lämmityksen säätöä. Alaluvussa 2.3.1 esitellään onnistuneen säädön kriteereitä ja perinteisiä tapoja säätää. Alaluvussa 2.3.2 taas käsitellään tulevaisuuden menetelmiä. Viimeisenä alaluvussa 2.3.3 kerrotaan sään vaikutuksesta sekä sääennusteiden ja ennakkoinnin hyödyntämisestä säädössä.

2.3.1 Säädön kriteerit ja perinteiset tavat

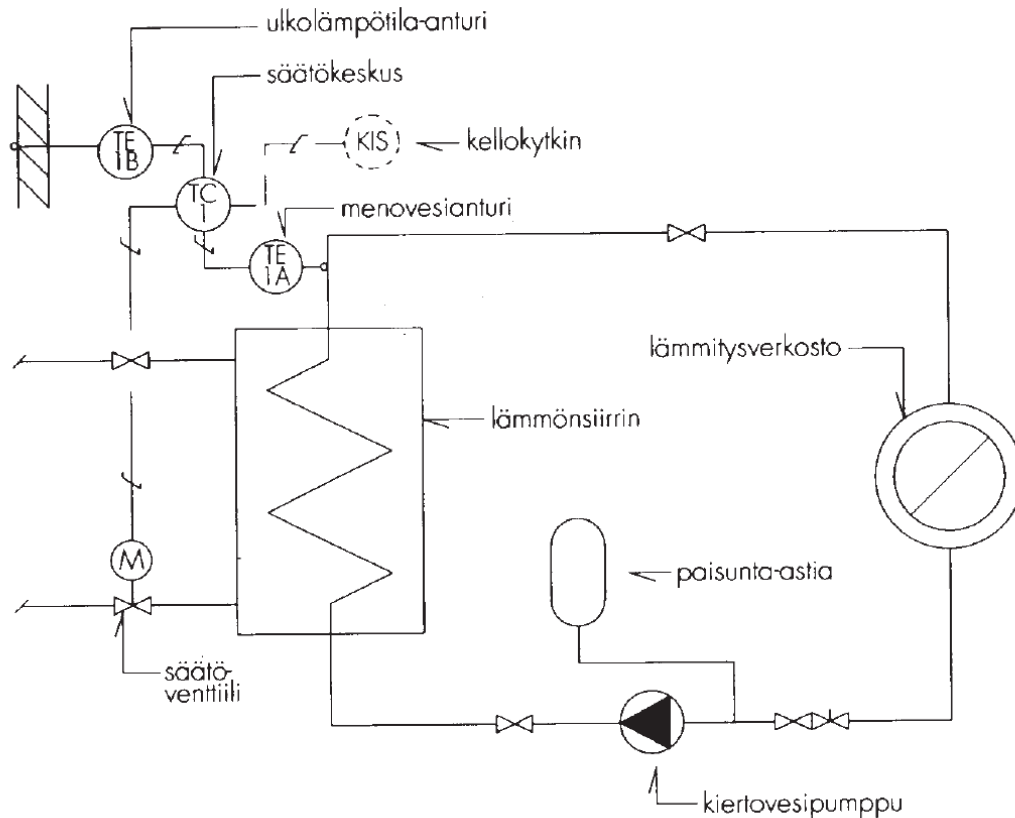
Mukavuutta ja taloudellisuutta voidaan pitää rakennuksen lämmityksen säädön onnistumisen tärkeimpinä kriteereinä [24]. Nykyaikaisen rakennusautomaation tavoit-

teenä yleisesti on siis saavuttaa tiloissa oleskelun mukavuusvaatimukset mahdollisimman pienellä energiankulutuksella [28]. Mukavuustasoon vaikuttavat useat eri tekijät, mutta lämmitysjärjestelmää tarkasteltaessa voidaan mukavuus määritellä huonelämpötilan mahdollisimman hyvänä pysyvyytenä asetusarvossaan. Taloudellisuudella viitataan taas mahdollisimman pieneen energiankulutukseen. Mukavuudesta ei tosin voida tinkiä edes energiataloudellisista syistä, mutta hyvin toimivalla säätöjärjestelmällä voidaan mukavuusvaatimukset saavuttaa pienemmällä kulutuksella. Lämmityksen säädön onnistumista voidaankin tarkastella energiankulutuksen kannalta kolmella tavalla. Ensinnäkin hyvä säätöpiiri pitää huonelämpötilan asetusarvossaan hyvin ja säästää näin lämmitysenergiaa. Toiseksi hyvin asetusarvossa pysyvää huonelämpötilaa voidaan laskea asumismukavuuden kärsimättä. Lopulta nopea huonekohtainen säätöjärjestelmä hyödyntää tehokkaasti ilmaisen energiaa [24]. Viihtyisän oleskelun kannalta huonelämpötilan voidaan katsoa saavuttaneen pysyvyystavoitteensa, jos se jatkuvassa seurannassa poikkeaa alle yhden asteen tavoitelämpötilastaan [25].

1970-luvun alussa kyseenalaistettiin jatkuvuustilan teoria ihmisen viihtyvyydessä sisäilmastossa ja esiteltiin näkemys mukautuvuudesta. Uusi teoria esitti, että mikäli oleskelijat rakennuksessa saavat vaikuttaa ympäristöönsä muuttamalla vaatetustaan, paikkaansa tai tilan säätöjä, he sietävät laajemmin erilaisia olosuhteita. Tällöin aiemmat hyvän mukavuustason standardit olivat turhan tiukkoja [18]. Tutkittaessa ihmisen viihtyvyyttä tilassa voidaan määritellä neljä ajanjaksoa, joilla luonnehditaan adaptiivista käytöstä. Lyhin ajanjakso on välitön eli olosuhteiden muuttuminen heti esimerkiksi vaatetuksen muuttamisella tai paikan vaihtamisella. Seuraava ajanjakso on tunnit eli kuinka olosuhteet vaihtuvat päivän aikana. Kolmannessa jaksossa päivä kerrallaan tarkasteltaessa esimerkiksi sää on vaikuttava suure. Pisin aikajakso viittaa vuodenaikojen vaihteluun [20].

Yleisimpiä lämmönjakelujärjestelmiä eli vesikiertoisia järjestelmiä on perinteisesti säädetty suoraan ulkolämpötilan perusteella. Perinteisen tavan menoveden lämpötilan säätö on esitetty kuvassa 6. Käyttäjän määräämien kertoimien perusteella muodostetaan ulkolämpötilariippuvainen asetusarvokäyrä, ja järjestelmä säätää sen perusteella lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötilaa. Perinteisesti asetusarvokäyränä on käytetty suoraa. Mikäli säätö ei ole optimaalinen, käyrää voidaan muokata suuntaissirrolla tai jyrkkyyden vaihteluilla. Säädin säätää menoveden lämpötilan karkeasti oikeaan suuruusluokkaan ja tarkka säätö tapahtuu patteritermostaateissa, jotka toteuttavat halutut lämpötilat huoneisiin. Lämmitysverkoston menoveden lämpötilaa säädetään kolmitieventtiilin avulla. Venttiili sekoittaa kattilasta tulevaa kuumaa vettä ja lämmitysverkoston paluuvettä asetusarvon mukaan. Kolmitieventtiilin ansiosta veden virtausnopeus putkistossa pysyy lähes vakiona riippumatta säätöventtiilin asennosta. Menoveden lämpötilaa säädetään monihuoneisessa kiinteistössä digitaalisella PI-säätimellä. [34]

Lähtökohtaisesti järjestelmässä ei oteta huomioon huonelämpötiloja. Mikäli tällainen ominaisuus halutaan, tulee järjestelmän piirissä olevat tilat varustaa huonelämpötila-antureilla. Tällöin säätökeskus muuttaa säätökäyrää automaattisesti huonelämpötila-antureiden mittaustietojen perusteella, kuitenkin niin että menoveden lämpötilan korkeudelle on asetettu rajoitus. Tyypillisesti antureita on yksi



Kuva 6: Patteriverkoston menoveden lämpötilan perinteinen säätö ulkolämpötilan perusteella kaukolämpölämmitteisessä järjestelmässä [10]

jokaisessa huoneistossa keskeisesti sijoitettuna [10]. Huonelämpötilamittausta käytetään menoveden lämpötilan säätöön kuitenkin vain poikkeustapauksissa. Yleensä huonekohtainen lämmityksen säätö tapahtuu termostaattisilla patteriventtiileillä [29].

Perinteisesti viihtyvyys ja taloudellisuus pyritään tavoittamaan toimenpiteiden aikatauluttamisella ja asetusarvojen muutoksilla. Aikatauluttamiseen sisältyy tilan käyttöaikojen arviointi ja sen mukaan järjestelmän käynnissäpito [28]. Mikäli rakennuksen käyttö ei ole jatkuvaa, voidaan rakennusta lämmittää jaksoittain. Antamalla tyhjillään olevan rakennuksen jäähtyä voidaan säästää jopa 30 % jatkuvaan lämmitykseen verrattuna. Lämpötila ei saa laskea kuitenkaan niin alas, että rakennukseen syntyy vaurioita [29]. Läsnaolotietoa hyödyntävissä järjestelmissä tulee ottaa huomioon, että tilojen palauttaminen mukavan oleskelun lämpötilaan vie aikaa [34]. Aikataulutusergelman optimaalinen ratkaisu kuitenkin vaatii järjestelmältä prediktiiuvisuutta, joka ottaa huomioon sekä rakennuksen dynamiikan että deterministiset ja stokastiset häiriöt kuten sääolot ja lämpökuormat [28]. Jotkut säätimet tarkkailevat myös kohteen energiantarvetta sekä ihmisten, valaisimien ja koneiden tuottamaa lisälämpöä [34].

Rakennusten teknisissä järjestelmissä esiintyy muutamia ominaisuuksia, jotka eivät välttämättä esiinny muiden teollisuuden haarojen tapauksissa. Nämä tulee ottaa huomioon sisäympäristön säätöstrategioiden suunnittelussa. Ominaisuuksiin kuuluvat järjestelmän dynaaminen epälineaarisuus, muutokset ajan suhteen ja säännölliset muutokset toimintapisteessä. Antureita on tyypillisesti vähän ja niistä saatava data on informaatioköyhää sekä epätarkkaa. A/D ja D/A -muuntimilla on huono resoluutio, ja näytteenotto ei ole riittävää trendeihin ja tiedon analysointiin. Erityisesti valvomotasolla säätölogiikat eivät ole standardoituja [28]. Eri rakennusautomaatiojärjestelmissä olevat säätöstrategiat, kuten suora digitaalinen säätö (DDC), aikaohjelmat, jaksottaiskäyttöohjelmat, porrastetun käynnistykseen ohjelma, käynnistysajan optimointiohjelmat sekä huipputehon rajoitusohjelmat, ovat kaikki melko samanlaisia. Ne on käytännössä kehitetty 1970-luvulla ja niiden oletetaan toimivan uusissa laitejärjestelmissä [24].

Yleisin takaisinkytketty säätötapa rakennusautomaatiojärjestelmissä on vieläkin PID. Usein säätimistä on kytketty derivaiva termi pois päältä, ja toisinaan säätimiä käytetään vain vahvistimina, mikäli järjestelmä sietää pysyvän poikkeaman. Lineaarisissa järjestelmissä PID-säätimet ovatkin hyviä pitämään systeemi asetusarvossaan ja sietämään häiriöitä. Epälineaarisissa järjestelmissä suljetun silmukan vaste kuitenkin riippuu toimintapisteestä. PID-säätimien käyttö onkin rakennusautomaatiossa ongelmallista, koska suurin osa prosesseista on ajan suhteen muuttuvia sekä luonnostaan epälineaarisia [28]. Lisäksi PID-säätimet eivät mukaudu järjestelmän muutoksiin. Alun perin hyvin viritetty PID-säädin voi olla kykenemätön säätämään tyydyttävästi 12 kuukauden kuluttua virityshetkestä [8].

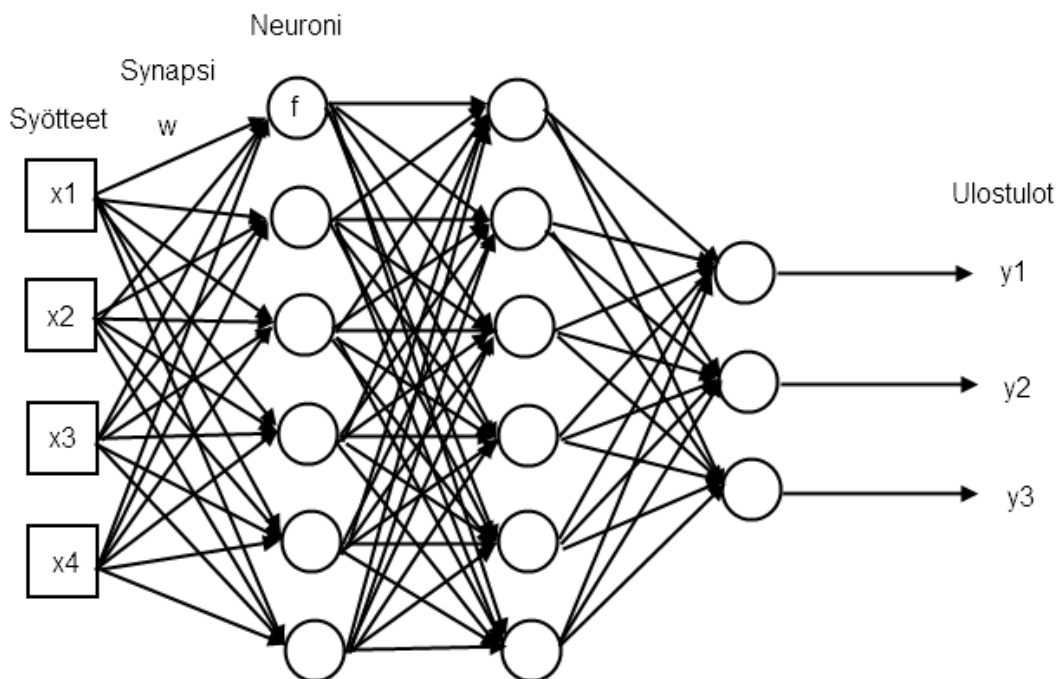
2.3.2 Uudet menetelmät säädössä

Älykkäiden ja oppivien menetelmien soveltaminen on ollut vielä harvinaista rakennussektorilla, vaikka monilla muilla tekniikan alueilla käyttö on ollut menestyksekkästä. Yksittäisiä sovelluksia löytyy kuitenkin myös rakennusautomaation piiristä [24]. Tiedeyhteisö on ollut innokas korvaamaan PID-säätimet rakennusten järjestelmissä sumeaa logiikkaa, neuroverkkoja ja prosessimalleja hyödyntävillä säätimillä. Teollisuus on kuitenkin ollut malttavainen uusien menetelmien käyttöönotossa. Ensinnäkin uusien säätimien robustisuus on vaikea taata erityisesti epälineaarisille ja yllättäville tapahtumille. Lisäksi asennusajan pidentyminen ylimääräisiä parametrien määrittämiä vaativien menetelmien takia tekee säätimistä epäkäytännöllisiä. Uudet säätimet ovat usein myös liian vaativia laskentatehollisesti huonolle laitteistolle [28].

Nykyisissä älykkäissä säätötavoissa hyödynnetään esimerkiksi itsevirittyviä ja adaptiivisia menetelmiä sekä neuroverkkoja ja sumeaa logiikkaa. Järjestelmätaso tarjoaa nykyään lisäksi parempia mahdollisuuksia eri valmistajien laitteiden yhteistoimintaan ja yritystasoiseen informaation integrointiin. Simulointien perusteella on saavutettu hyviä tuloksia kokonaisten pientalojen lämmitysjärjestelmien säätöön kehitetyillä adaptiivisilla säätimillä. Eräs yksittäinen rakennusautomaation sovelluskohde oppivaan säätöön on käyttäjien toiminnasta oppiva huonetermostaatti. Termostaatista pystyy valitsemaan toimintatilaksi viihtyvyystilan, energiansäästötilan tai manuaalitalan. Viihtyvyystila on opittu käyttäjän toiminnan mukaan, ener-

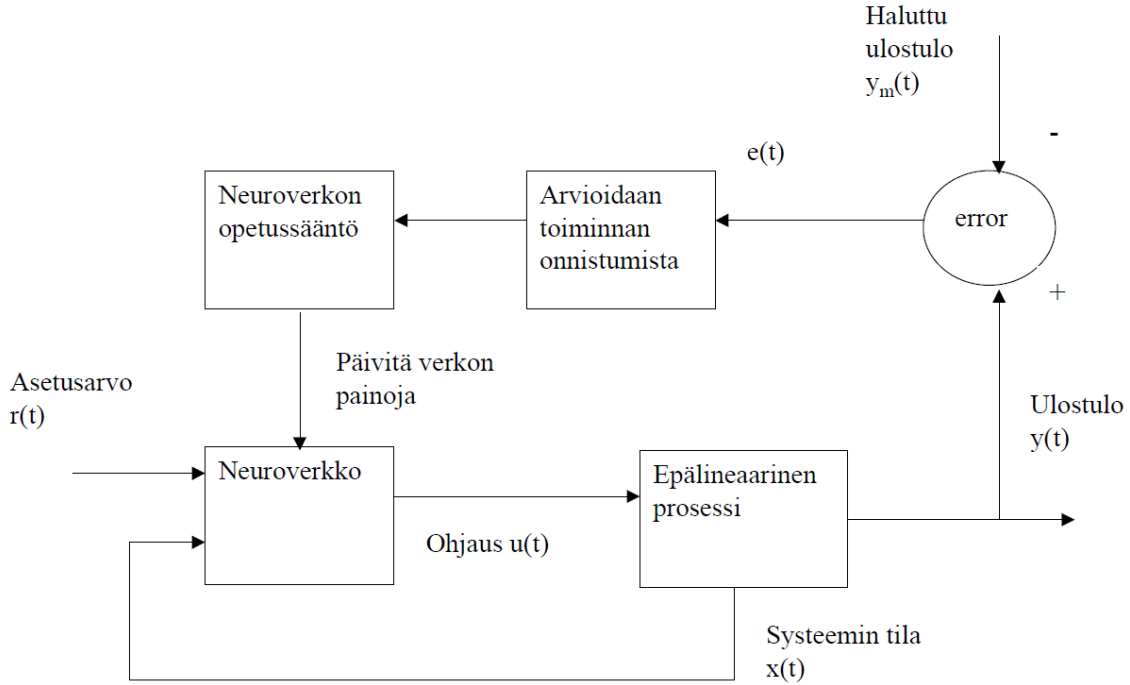
giansäästöä käytetään, kun tilassa ei ole ihmisiä ja manuaalitila pitää lämpötilan käyttäjän asettamassa asetusarvossa. [24]

Neuroverkkoja alettiin kehittää 1950-luvulla pyrkimyksenä mallintaa matemaattisesti ihmisaivoja ja niiden oppimisprosessia. Kuvassa 7 nähdään neuroverkkomallin perusajatus. Verkon päätoimintayksikkö on nimeltään neuroni. Neuronit ottavat vastaan syötteitä synapseja pitkin. Tulevat aktivaatiot kerrotaan synapsien painoarvoilla w ja summataan. Poistuvat aktivaatiot päätetään kynnysfunktion f avulla. Neuroverkot opetetaan esittämällä niille malleja ja painottamalla synapsit mallien mukaan. Neuroverkon opetusprosessi aloitetaan asettamalla tekijät, jotka vaikuttavat ongelmaan tulosuureina. Periaate adaptiivisen neuroverkon toimintaan on esitetty kuvassa 8. Rakennusautomaatiojärjestelmissä neuroverkon tulosuureita on useita. Lämmityksen säätöön vaikuttavat esimerkiksi rakenteelliset seikat ja sääolot. Suureet luokitellaankin tässä tapauksessa kolmeen ryhmään. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat ne suureet, jotka eivät vaihtelevat järjestelmän ollessa pois päältä. Toisessa ryhmässä ovat ne, jotka vaihtelevat pitkällä aikajänteellä ja viimeisessä ne, jotka vaihtelevat lyhyessä ajassa. [35]



Kuva 7: Neuroverkkomallin perusajatus

Usein lämmityksen, ilmanvaihdon ja ilmastoinnin huono toimivuus johtuu perinteisten säätöjärjestelmien kyvyttömyydestä käsitellä epälinearisuuksia ja mukautua pitkän aikavälin muutoksiin [8]. Rakennuksen terminen käyttäytyminen on kokonaisuudessaan epälineaarista myös vaihtelevien lämpökuormien ja käyttäjien käytöksen takia [19]. Neuroverkkoja hyödynnetään yleisesti juurikin epälinearisuusongelmien



Kuva 8: Neuroverkkosäätöön perustuvan adaptiivisen järjestelmän toimintaperiaate [24]

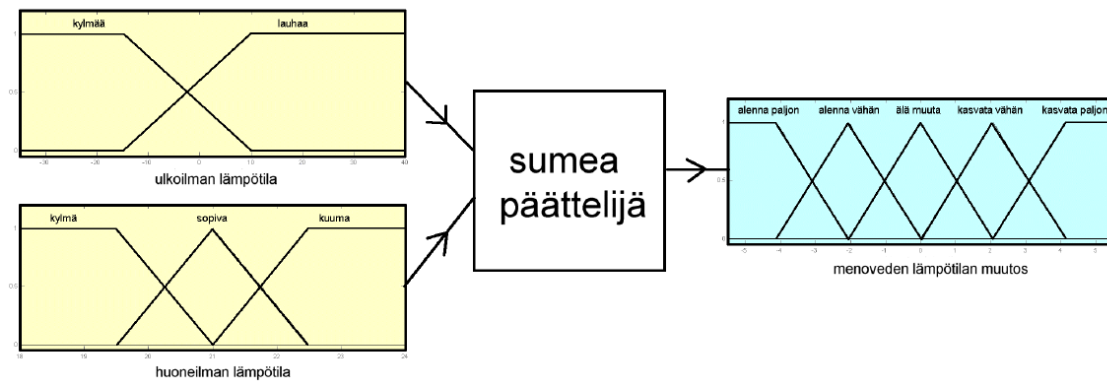
ratkaisemisessa ja siksi neuroverkkoja käytetään enenevässä määrin rakennusautomaatiojärjestelmissä [8]. Neuroverkkojen käyttämisessä rakennusautomaatiossa on muutamia hyötyjä. Ensinnäkin niiden käyttöönotto ja toimivuuden varmistaminen vaativat vähemmän määrittelyä ja työtä kuin perinteisten säätöjärjestelmien. Toiseksi poikkeamat ja häiriöt signaalissa eivät aiheuta suuria ongelmia järjestelmän toiminnassa. Lisäksi verkon opittua rakennuksen käyttäytymismalli sen vasteaika paranee huomattavasti [35].

Neuroverkkoja voidaan rakennuksissa hyödyntää esimerkiksi ennakoimaan toimintaa ja energiankulutusta. Lisäksi niitä voidaan hyödyntää kerätyn mittausdatan analysoinnin yksinkertaistamisessa sekä epälineaaristen LVI-prosessien säädön parantamisessa. Neuroverkkoja on myös hyödynnetty prediktiivisessä säädössä sekä opetettu toimimaan kompensattoreina parantaen perinteistä takaisinkytkettyä säätöä [24]. Neuroverkkojen yhdistäminen takaisinkytkettyyn säätöön aiheuttaa kuitenkin helposti epästabiilisuutta järjestelmään [8]. Lisäksi neuroverkoilla voidaan mallintaa ja ennustaa kuten klassisilla tilastollisilla menetelmillä, ja useat esimerkit todistavat, että neuroverkot ovatkin tehokkaita näissä tehtävissä [2]. Kun hyödynnetään sanallista sumean logiikan parametrien määrittelyä, voidaan neuroverkkoperusteisen lämmitysjärjestelmän parametreiksi lisätä epäeksaktejakin suureita kuten käyttömukavuus [19].

Eräänä esimerkkinä neuroverkkojen hyödynnettävyydestä rakennuksissa on so-

velluskohde, jossa pyrittiin lämmittämään kasvihuone optimisäädöllä. Neuroverkon opettaminen oli huomattavan hankalaa, koska se ei aluksi tuntunut pystyvän opimaan kasvihuoneen dynamiikan ja säätilojen luonnonlakeja. Kuitenkin klassisia mallinnusmenetelmiä hyödyntämällä saatiin lopulta optimoitua neuroverkoilla säätöä ennestään. [24]

Sumea logiikka matkii ihmisen päätöksentekoa ja se sopii hyvin sovellettavaksi tilanteissa, joissa on asiantuntijatietoa käytettävissä, tai joissa halutaan mallintaa ihmisen käyttäytymistä ja mieltymyksiä. Sumean logiikan säädin ei ole yhtä herkkä epälineaarisuuksille kuin esimerkiksi PID-säädin. Rakennuksissa sumeaa logiikkaa voidaan hyödyntää robustiin lämpötilan säätöön, ottamaan huomioon yksilölliset tarpeet säädössä ja minimoimaan energiankulutusta. Energiankulutusta vähennetään määrittelemällä lämmityksen, jäähdytyksen ja kostutuksen asetusarvot kuorimitustilanteita vastaaviksi [24]. Taloteknisissä sovelluksissa sumeaa logiikkaa kuitenkin käytetään lähinnä lämmityksen säädön ongelmissa [17]. Kuvassa 9 on esitetty sumean päättelijän toimintaperiaate tilanteessa, jossa ulko- ja sisälämpötiloista lasketaan patteriverkoston menoveden lämpötilan muutos.



Kuva 9: Sumean päättelijän periaate rakennusautomaation sovelluksessa, jossa ulko- ja sisälämpötiloista lasketaan patteriverkoston menoveden lämpötilan muutos [24]

Rakennusautomaatiojärjestelmiä erotellaan vieläkin lähes ainoastaan teknisten ominaisuuksien perusteella, kun asiakastytyväisyys sisäilman laadusta, energiatehokkuudesta ja käyttökustannuksista olisi nykyaikaisempi lähestymistapa. Simulointituloksilla on osoitettu, että perinteisillä suureilla säädettyä korkeampi mukavuustaso alhaisemmilla kustannuksilla voidaan saavuttaa säätämällä ihmisen kokemaa mukavuustasoa. Tällöin sumeaa logiikkaa siis hyödynnetään mallintamaan ihmisen aistimusta. Sumeaan logiikkaan perustuvilla menetelmillä voidaan myös ennustaa rakennuksen energiankulutusta hyvin tuloksin. Huomattavan laaja säännöstö luodaan säästä ja rakennuksen lämpövirroista kerättyjen tietojen perusteella. [24]

Sumealla säädöllä on mahdollista säätää rakennuksessa lähes jokaista suuretta. Esimerkiksi on kehitetty menetelmä, joka sumealla logiikalla muodostaa patteriverkoston kompensointikäyrän. Aiemmin huoltomies muutti kokeiluperusteisesti käyrän asemaa ja jyrkkyyttä asukkaiden palautteen perusteella, kun taas uudessa menetel-

mässä sumea päättelijä laskee menoveden lämpötilan muutoksen ulko- ja huone- lämpötilojen perusteella. Tällaisenaan hyödynnetystä päättelijästä tosin todettiin olevan hyvin vähän lisähyötyä, koska suoramuoitoinen kompensointikäyrä on yleensä riittävä ja se on nopea saada paikalleen perinteiselläkin tavalla. [24]

Rakennusautomaatiossa on myös tutkittu neuroverkkojen ja sumean logiikan yhdistämistä, esimerkiksi sumeaa logiikkaan perustuvan säätöjärjestelmän virittämistä neuroverkkojen avulla [24]. Sumean logiikan lisäksi karkeiden joukkojen teoria on LVI-järjestelmien säätöön varteenotettava vaihtoehto. Karkeat joukot on epävarman tiedon käsittelyyn tarkoitettu menetelmä, joka on täysin dataan perustuva eli ilmiöltä ei vaadita minkäänlaista teoreettista mallia kuten todennäköisyysjakaumaa [15]. Sumeaa logiikkaa ja karkeita joukkoja onkin vertailtu keskenään lämmityksen ja kosteuspitoisuuden säädössä. Sumean logiikan säädössä käytettiin sisäänmenomuuttujien sumeutuksessa seitsemää kolmiomaista jäsenyysfunktia ja ulostulomuuttujien yksikköfunktia. Sumea päättely tehtiin Mamdani-tyyppisesti, eli sääntöjen seurausosat määriteltiin sumeina joukkoina, ja päättelytulo selkeytettiin painopistemenetelmällä. Lämpötilan ja kosteuspitoisuuden säätöön määriteltiin päättelysäännöt erikseen. Karkeiden joukkojen teoriassa käytettiin datan esitykseen tavallisia joukkoja. Vertailussa molemmissa tavoissa hyödynnettiin samoja ulostulomuuttujien jäsenyysfunktia ja päättelysääntöjä. Sumea logiikka antoi hieman parempia tuloksia sekä lämpötilan että kosteuspitoisuuden säädössä [24].

Matemaattisten mallien hyödyntäminen rakennusten diagnostiikassa on hyvin yleistä. Mallipohjaiset menetelmät ovat vakiintuneet tutkimukseen ja niitä on hyödynnetty myös rakennusautomaation sovelluksissa. Yleisesti ottaen mallipohjaiset menetelmät eivät kuitenkaan toimi hyvin, koska niillä ei pysty kuvaamaan tyydyttävästi epälineaarista käyttäytymistä. Mallin epätarkkuus johtaa vääjäämättä vääriin hälytyksiin, mikä estää lähestymistavan laajemman hyväksymisen. Teollisuuden vastahakoisuutta uusia menetelmiä hyödyntäviin säätimiin on pyritty loiventamaan hybridiratkaisuilla. Rakennusautomaatioalalla on esimerkiksi laajasti otettu käyttöön adaptiivinen hybridisäädin, jossa perinteiseen PID-säätimeen on lisätty lisäosa hahmontunnistusta varten. [28]

Rakennusteollisuus on opittuaan vasta ymmärtämään PID-säätöä kunnolla ollut vastahakoinen ottamaan käyttöön black box -tyyppiseen ajatteluun perustuvaa säätöä [28]. Black box -tyyppisessä lähestymistavassa ei tunneta järjestelmän säätöfunktion muotoa eikä parametreja [15]. Matemaattisista malleista black box -menetelmää pidetään epätehokkaimpana menetelmänä erityisesti verrattaessa hyvin määriteltuihin perinteisiin mallinnusmenetelmiin [2]. Epätehokkuuden lisäksi ne ovat epäkäytännöllisimpiä johtuen järjestelmän opettamiseen edellytetyn datan hankinnan kustannuksista. Black box -mallit ovat taipuvaisia myös huonoon ekstrapolointikykyyn, jolloin niistä tulee epäluotettavia olosuhteiden muuttuessa. Fysiikan lakien, kuten termodynamiikan, perusteella luodut mallit voivat vähentää opetusdatan tarvetta ja parantaa kykyä ekstrapoloida, mutta ovat silti epätarkkoja. Lisäksi fysiikkaan pohjautuvien mallien parametrien määrittely voi olla vaikeaa ja kallista [28].

Mallipohjaisella ennakoinnalla säädöllä (MPC) ei tarkoiteta mitään yksittäistä strategiaa vaan ryhmää alun perin 70- ja 80-luvuilla kehitettyjä säätömenetelmiä. Näissä prosessin malli on selkeästi ilmaistu, jotta säätösignaali voitaisiin laskea mi-

nimoimalla osittain rajoitettua kustannusfunktioita. Rakennuksen fysiikka voidaan muodostaa matemaattisessa mallissa, jota hyödynnetään ennustamaan rakennuksen käyttäytymistä tietyn toimintastrategian sekä sää- ja käyttöennusteen mukaan. Mallipohjainen ennakointi on kehittynyt tekniikka, joka ottaa huomioon sekä energiansäästön että hyvät sisäolosuhteet. Mallipohjaista ennakointia käytetään rakennusautomaatiossa erityisesti rakennuksen termisen massan ja lämmönvarastoinnin huomiointikyvyn takia [31]. Eräiden tulkintojen mukaan fysiikkaperusteisista malleista tulee välttämättömiä tulevaisuuden rakennusten toiminnassa, koska mallit mahdollistavat resurssien tehokkaan käytön ja ennustavat tarkasti päivittäisen sähkönkulutustarpeen [38].

2.3.3 Sään vaikutus ja ennakointi

Rakennusten lämmityksen säädön olennaisin parametri on ulkolämpötila. Se mitataan kahden metrin korkeudelta, mutta käytännössä ulkolämpötila voi kuitenkin vaihdella huomattavasti vaak- ja pystysuunnassa. Vaakatasossa lämpötila vaihtelee erityisesti rinteissä, koska niissä kylmä ilma valuu alaspäin. Pystysuunnassa lämpötila vaihtelee eniten pilvettöminä tyyninä öinä, jolloin lämpötilan kerrostuminen on selvää. Tällöin maanpinnan ja ulkolämpötilan mittauskohdan välinen lämpötilaero voi olla jopa 8 – 10 astetta. Ulkoilman keskilämpötiloja tarkasteltaessa voidaan todeta niiden merkityksettömyys rakennuskorkeuksilla, koska lämpötila kasvaa pystysuunnassa ensimmäisen kilometrin aikana yhden asteen sataa metriä kohden. Vuorokauden korkein lämpötila on rannikolla ja merellä talviaikaan noin kaksi tuntia ja kesäaikaan noin kolme tuntia auringon korkeimman asemansa ohittamisen jälkeen. Sisämaassa ajankohta on hieman myöhemmin. [29]

Toisinaan perinteisissä PI-säätimissä käytetään tuulikompensaatiota parantamaan säädön tarkkuutta. Tilastollisesti on todennäköistä, että usein ulkolämpötilan ollessa noin nolla myös tuulee ja sataa. Tällöin lämpöhäviöt ovat suhteessa korkeimmillaan. Pakkaspäivinä taas on todennäköisesti tyynä. Näiden tietojen perusteella asetusarvokäyrää voidaan taivuttaa täsmäämään paremmin todellista tilannetta [34]. Tuulen vaikutusta rakennuksen energiankulutukseen on kuitenkin erittäin vaikea määrittellä tarkasti. Yksinkertaisimmissa laskentamenetelmissä rakennuksen tuulikenttää kuvataan havaintoasemalla mitatun tuulen perusteella arvioidulla tuulella eli räystäskorkeuden tuulella. Tällainen kuvaus on luotettava ainoastaan erittäin tasaisella alustalla havaintoaseman sijaitessa lähellä ja erityisesti rakennuksen ollessa yksinäinen. Rakennettu ympäristö ja vaihteleva maasto vaikeuttavat räystäskorkeuden tuulen määrittelyä huomattavasti [29]. Suomessa lämpötilaerot aiheuttavat huomattavasti enemmän vuotoilmaa kuin tuuli. Tuuliolosuhteet voivat kuitenkin lisätä suuresti vuotoilman määrää, mikä huomattiin vertailemalla vuotoilmatasoa tuulelta suojassa olevissa ja tuulen vaikutukselle alttiissa rakennuksissa [13].

Tuulen lisäksi rakennuksen lämmitykseen vaikuttavat ilman kosteus, auringon säteily ja rakennuksen massa. Auringon säteilyn määrä riippuu maastosta ja erityisesti rinteiden kaltevuudesta ja suunnasta. Etelärinteille saa eniten säteilyä, mutta maanpinta lämpenee eniten lounaisrinteillä, koska sinne aurinko paistaa pisimpään vuorokaudessa. Usein oletetaan rakenteiden lämmönjohtavuuden olevan riippuma-

ton lämpötilasta, mikä onkin usein riittävä arvio mitoituksia tehtäessä. Todellisuudessa rakenteiden lämmönjohtavuus kuitenkin kasvaa lämpötilan mukana sitä voimakkaammin mitä huokoisempaa materiaali on. Huokoisissa materiaaleissa olennaisista lämmönjohtavuuden kannalta on niiden sisältämä neste tai vesihöyry, sillä vesi johtaa lämpöä noin 25 kertaa paremmin kuin ilma. Lisäksi vesi liikkuu huokosis-
sa ja kuljettaa lämpöä mukanaan. Merkittävimmät kosteuden lähteet rakenteissa ovat sade, rakennusaikainen kosteus, maaperän kosteus, pintavesi, ilman kosteus, käyttövesi, vesivuodot ja pinnalle tiivistynyt kosteus [29].

Sisälämpötila seuraa lämmitystehossa tapahtuvia muutoksia tietyllä viiveellä rakennuksen suuren lämpökapasiteetin takia. Positiivisia seurauksia tästä ovat sisälämpötilan vakaus ja rakenteisiin varastoituva ilmaislämpö. Haittana ovat vaikeudet reagoida nopeasti muutoksiin [29]. Ongelmana perinteisessä asetusarvokäyrään pohjautuvassa säädössä onkin, että rakenteisiin varautunut lämpö vääristää olosuhteita ulkolämpötilan vaihdellessa. Rakenteisiin varautunut lämpö aiheuttaa yllämmitystä tilaan ulkolämpötilan laskiessa ja tällöin menoveden lämpötilan noustessa. Sama toimii myös toisinpäin: ulkolämpötilan noustessa ja tällöin menoveden lämpötilan laskiessa viileät rakenteet kylmentävät tilaa kunnes ehtivät lämmitä. Huonetermostaatit vähentävät tämän ilmiön vaikutusta [34].

Nykyisissä energianhallintateknologioissa ongelmana on, että ne ovat ainoastaan reaktiivisia ja pystyvät näin ollen toimimaan vain sen hetkisen tilanteen mukaan. Uudet ennakoivat menetelmät auttavat rakennusautomaatiojärjestelmää hyödyntämään useampia osiaan systemaattisesti, ennustamaan tulevia kustannuksia, ennakkoimaan sähkönkulutusta ja nostamaan takaisinkytketyn säätöpiirin robustisuutta [38]. Ennustavan säädön suurin hyöty on kuitenkin lämmönjakelujärjestelmän sopeuttaminen etukäteen lämmöntarpeen ennusteen mukaan [16].

Eräs rakennusautomaatiojärjestelmiin kehitetty menetelmä käyttää ennustamiseen numeerista optimointia lineaarisessa dynaamisessa mallissa laskeakseen lämpötilan asetusarvon lämmitysjärjestelmän säätöpiirille. Tarkoituksena on ylläpitää energian minimikulutuksella mukavaa lämpötilaa. Toisessa tutkimuksessa kehitettiin ratkaisua, jolla jäähdytettiin rakenteita ennakoivasti tilojen pitämiseksi viileänä. Ennakoivalla järjestelmällä pystyttiin laskemaan kustannuksia huomattavasti. Kolmannessa sovelluksessa pyrittiin optimoimaan passiivitalon lämmitystä ennakoimalla auringon lämmitystä ja sisäisiä kuormia [3]. Neljäs ennakoiva sovellus hyödyntää energianhallinnassa ennustavaa dynaamista mallia rakennuksesta sekä ennustuksia tehokkuuteen ja hintaan vaikuttavista häiriöistä. Strategia perustuu epälineaariseen sekalukuoptimointiin ja pystyy hyödyntämään ennusteita niin säästä, polttoaineen hinnasta, lämpökuormista kuin käyttövaatimuksistakin [38].

Ennustava ja mukautuva lämmityksen NEUROBAT-säädin hyödyntää neuroverkkoja, jotta säätömalli voisi mukautua olosuhteisiin, rakennuksen ominaisuuksiin ja käyttäjien käytökseen. Säädin on kehitetty erityisesti vesikiertoiisiin lämmitysjärjestelmiin. Säädin hyödyntää sääennusteita, kuten auringon säteilyä ja lämpötilaa, ja optimoi näiden perusteella käyttömukavuutta pitkällä tähtäimellä. Uusi säätöalgoritmi saadaan toimimaan perinteisten toimilaitteiden kanssa kaskadisäädön avulla. Ulompi säätösilmukka optimoi lämmitystehoa ja sisempi silmukka säätää menoveden lämpötilaa. Säädin ei hyödynnä rakennuksen fysikaalista mallia vaan lähinnä

käyttäytymisen perusteella luotua mallia. Säätimessä on kolme oppivaa neuroverkkoa. Rakennuksen mallia varten on yksi verkko ja säämallia varten kaksi. Algoritmin optimaalisen säädön moduuli hyödyntää ennusteita ja minimoi kustannusfunktioita. Kustannusfunktio mahdollistaa kompromissien teon energiankulutuksen ja termisen viihtyvyyden välillä. Funktio on tehty kahdesta termistä, joista toinen ottaa huomioon energiankulutuksen ja toinen termisen viihtyvyyden ennakointiajan puitteissa. Kun viihtyvyystermiä painotetaan Fangerin lämpövihtyvyyden toisella potenssilla, voidaan tilan viihtyvyystaso pitää toivottuna [19]. Fangerin mukaan sisäilmasto on ihanteellinen, kun ihminen pitää lämpövihtyvyyttä neutraalina ja Fangerin lämpövihtyvyys mittaakin poikkeamaa neutraalista [23]. Testien mukaan NEUROBAT-algoritmillä saatiin 13 % säästö lämmitysenergian kulutukseen [19].

Sääennusteiden hyödyntämistä on tutkittu rakennusautomaatiossa esimerkiksi sähköenergian kulutuksen ennustamisessa [3]. Sääennusteita käytetään rakennusautomaatiojärjestelmissä myös useilla muilla tavoilla. Korkeammalla päätöksentekotasolla sääennusteiden avulla arvioidaan ekonomisia suureita kuten energiankulutusta. Lähimpänä järjestelmätasoa ennusteilla voidaan taas arvioida yksittäisiä suureita, kuten tuulen nopeutta tai auringon säteilyä [37]. Energiankulutusta voidaan ennakoita sääennusteiden avulla, koska ulkolämpötilan vaihtelut vaikuttavat lämmityksen ja ilmastoinnin sekä automaattiseen säätöön että käyttäjien manuaalisiin lisäyksiin. Erityisesti energian toimittajat hyötyvät tästä informaatiosta, koska voivat ennakoita kulutuspiikit [6].

Australiassa tehdyssä tutkimuksessa huomattiin erityisesti säätilan vaikutus energiankulutukseen lämpimänä vuodenaikana, jolloin rakennuksia tuli jäähdyttää. Lämmitysjakson aikana kylmimpinä päivinä vain 65 % kotitalouksista lisäsi lämmitystä, kun jäähdytysjaksolla kuumimpina päivinä 90 % kotitalouksista lisäsi viilenystä [6]. Sääolojen ennustaminen on haastavaa, koska ne riippuvat huomattavan kompleksisista fysikaalis-kemiallisista ilmiöistä. Tarkkoja ennusteita tarvitaan, mikäli taloudellinen toiminta riippuu sääolosuhteista, kuten tuulivoimaloissa, tai mikäli toiminta-alue on tiukkaan rajattu, kuten sisälämpötilavaihtelut rakennusautomaatiojärjestelmille. Tällöin ennusteiden epävarmuus tulee laskea sopivien stokastisten ja robustisten optimointialgoritmien avulla. Kaupallisten sääennustustoimittajien data ei välttämättä ole tarpeeksi yksityiskohtaista, jotta epävarmuustekijät voitaisiin määritellä tarkasti [37]. Sääennusteita hyödyntävän säädön toimivuus on todettu erityisesti pitkän vasteajan sulautetun vesikiertoisen lattialämmityksen sovelluksessa. Sovelluksessa määriteltiin huonetilojen termiset ominaisuuden neuroverkkojen avulla ja sääennusteiden perusteella asetettiin lämmitysjärjestelmän päällä- ja pois- saoloajat [16].

3 Data-analyysi

Työssä hyödynnettiin mittausdataa kuudesta pääkaupunkiseudulle sijoittuvasta kerrostalokohteesta. Analyysissä painotettiin kohteena Schneider Electricin Vantaan konttoria, jonka järjestelmä tunnettiin tarkimmin ja josta mittauksia saatiin eniten. Luvussa 3.1 käsitellään viiden kohteen sisälämpötila-analyysiä ja luvussa 3.2 perehdytään Vantaan konttorin analyysiin.

3.1 Sisälämpötila-analyysi useissa kohteissa

Tässä luvussa analysoidaan viiden pääkaupunkiseudulle sijoittuvan erilaisen rakennuskohteen mittausdataa. Luvussa 3.1.1 kuvataan kohteet ja menetelmät. Luvussa 3.1.2 taas tarkastellaan mitattua dataa ja viimein luvussa 3.1.3 kerrotaan mihin johtopäätöksiin datan tarkastelulla päästiin.

3.1.1 Kohteiden ja menetelmien kuvaus

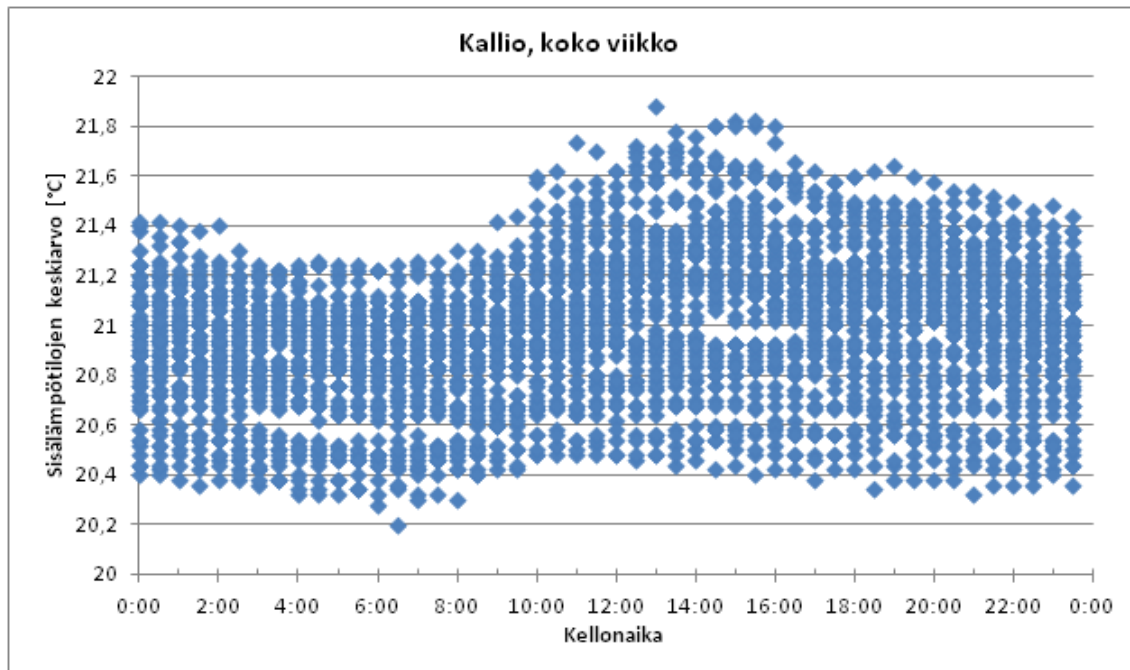
Sisälämpötila-analyysissä hyödynnettiin viiden pääkaupunkiseudulle sijoittuvan kerrostalokohteen mittautietoja. Tietoina saatiin vartin välein sisälämpötila, ulkolämpötila sekä patteriverkoston meno- ja paluuviesien lämpötilat. Säätilatiedot saatiin Forecalta, joka toimittaa tunnin välein tunnittaisen ennusteen kolmelle vuorokaudelle ulkolämpötilasta, aurinkoisuudesta, pilvisyydestä, sateen todennäköisyydestä, tuulisuudesta, tuulen suunnasta ja suhteellisesta kosteudesta. Foreca toimittaa ennusteet paikkakuntakohtaisesti. Forecan havaintoasemien sijoittelusta johtuen myös datan ensimmäisen eli kuluvan ennustetunnin arvot ovat approksimaatioita, jotka ovat muodostettu automaattisesti havainnoista ja täsmennetty meteorologin korjausten mukaan.

Kohteet ovat koulu Kalliossa (1.3. – 30.4.2012), toimistotalo Kaisaniemessä (1.3. – 1.5.2012), kaksi asuinkerrostaloa Jakomäessä (9.4. – 30.4.2012) ja kauppakeskus Espoossa (30.4. – 6.5.2012). Kalliossa sijaitsevaa koulua käyttää arkipäivisin noin 430 henkilöä ja Kaisaniemen toimistotaloa noin 300 henkilöä. Jakomäen asuinkerrostaloista ensimmäisessä sijaitsee 84 tavallista asuntoa ja toisessa 92 pientä asuntoa palvelutalokompleksina. Espoon kauppakeskus sisältää pääasiassa huonekaluliikkeitä. Kohteiden lämpötilojen säädössä ei ole käytetty erityisiä säätöalgoritmeja.

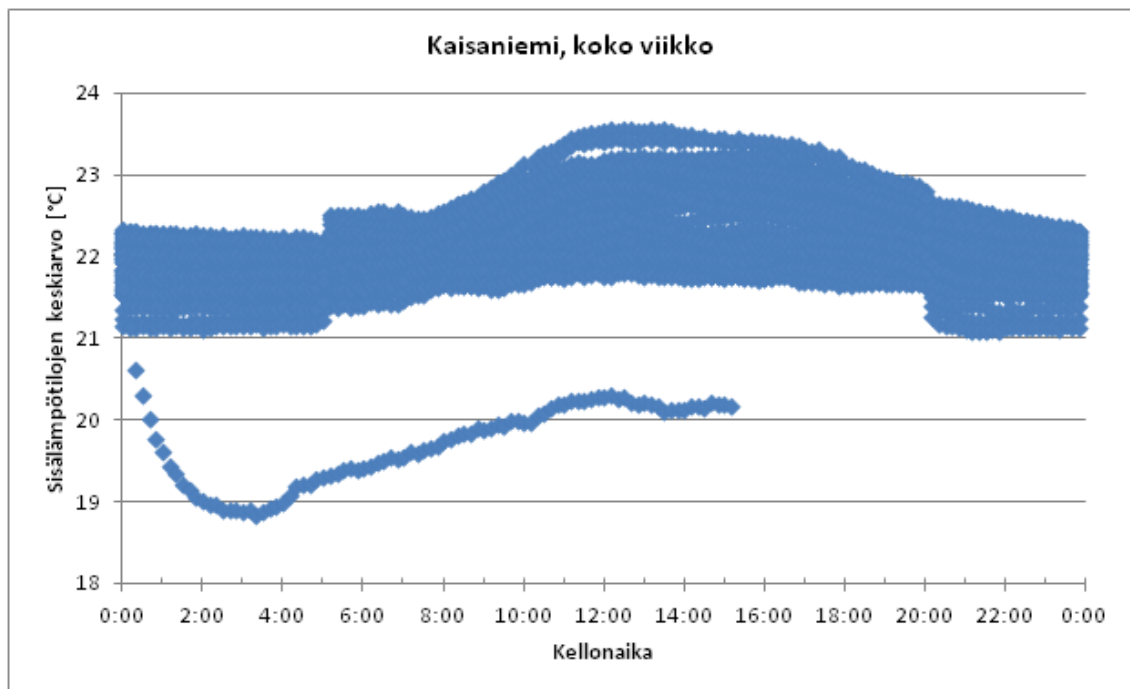
3.1.2 Datan tarkastelu

Sisälämpötila-analyysin datan tarkastelussa etsittiin aluksi yhteyttä kellonajan ja sisälämpötilan välillä. Kuvissa 10 – 14 esitetään viiden kohteen sisälämpötilojen riippuvuus kellonajoista, kun mukana on kaikki viikonpäivät. Kuvissa 15 – 19 taas nähdään kellonajan ja sisälämpötilan suhde arkena ja kuvissa 20 – 24 viikonloppuisin. Kuviin on piirretty yksittäin jokainen vartin välein mitattu sisälämpötilan piste.

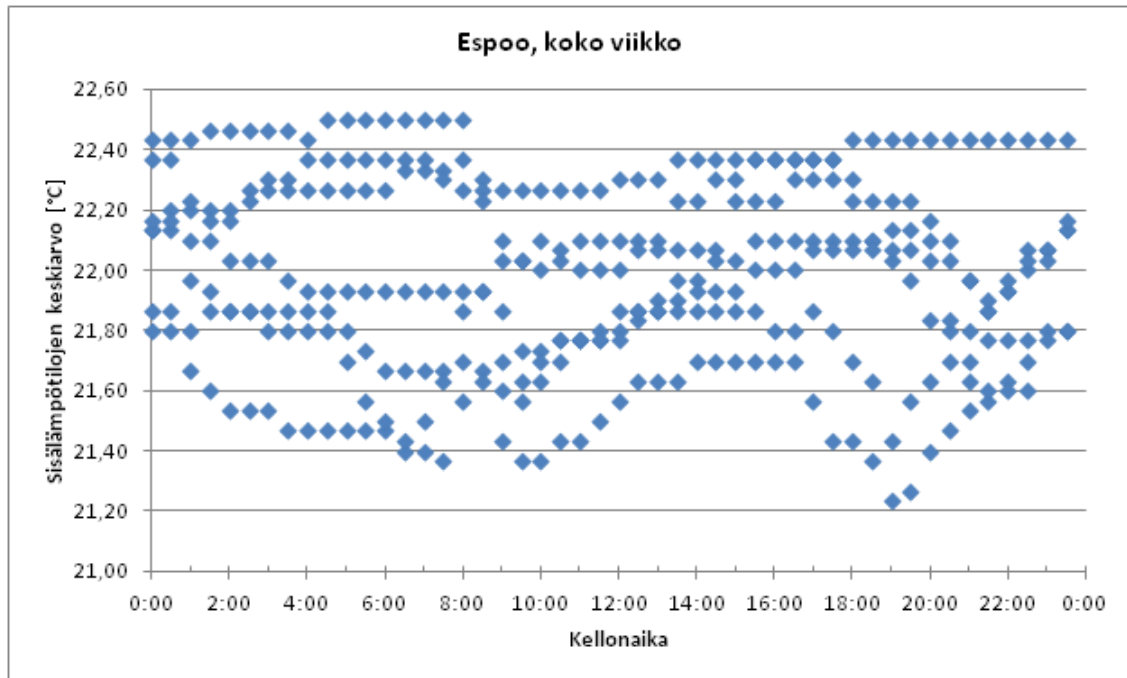
Kuvissa 10 – 14 esitetään sisälämpötilan ja kellonajan suhde kaikkina viikonpäivinä. Kuvista on selkeästi huomattavissa kiinteistöjen lämpökäyttäytymisen erot. Kuvissa 10 ja 11 nähdään, miten koulussa ja toimistorakennuksessa lämpötila nousee



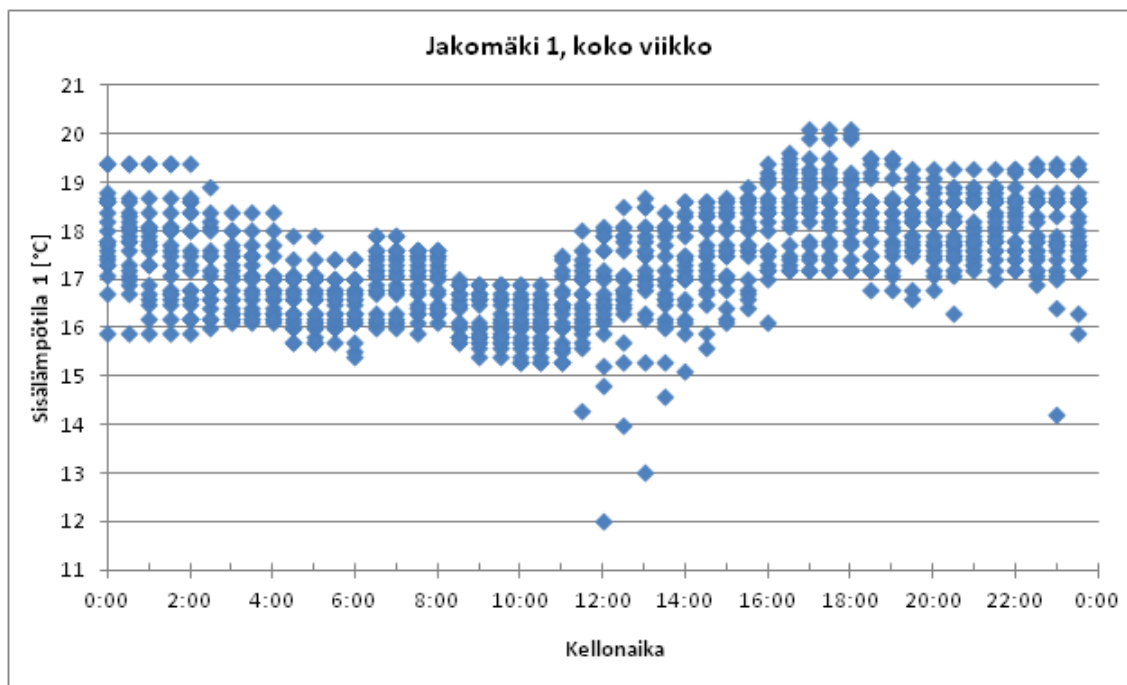
Kuva 10: Kallion koulun sisälämpötilan suhde kellonaikaan ajanjaksolla 1.3. – 30.4.2012



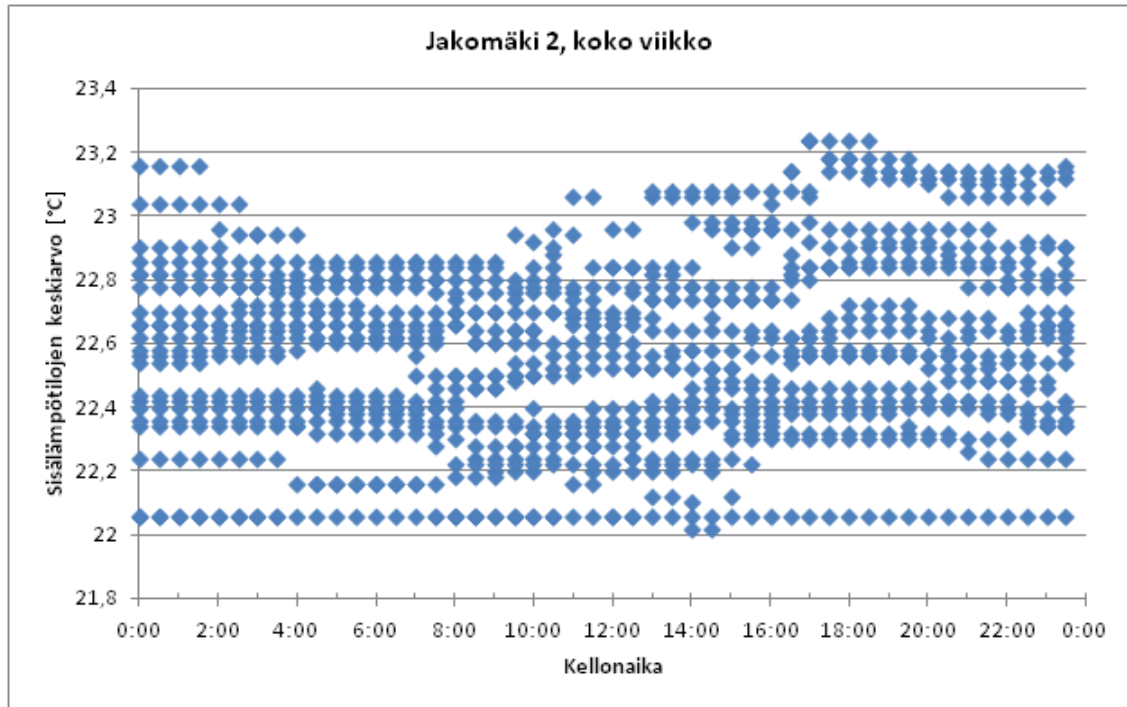
Kuva 11: Kaisaniemen toimistorakennuksen sisälämpötilan suhde kellonaikaan ajanjaksolla 1.3. – 1.5.2012



Kuva 12: Espoon kauppakeskuksen sisälämpötilan suhde kellonaikaan ajanjaksolla 30.4. – 6.5.2012



Kuva 13: Jakomäen ensimmäisen asuinkiinteistön sisälämpötilan suhde kellonaikaan ajanjaksolla 9.4. – 30.4.2012

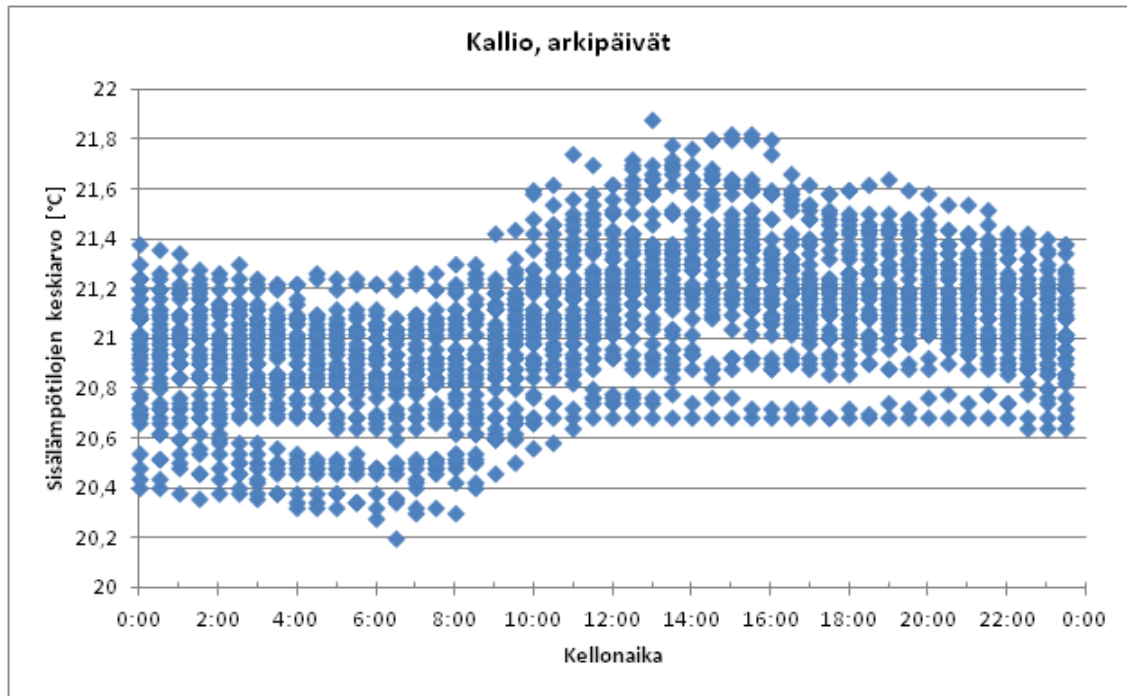


Kuva 14: Jakomäen toisen asuinkiinteistön sisälämpötilan suhde kellonaikaan ajanjaksolla 9.4. – 30.4.2012

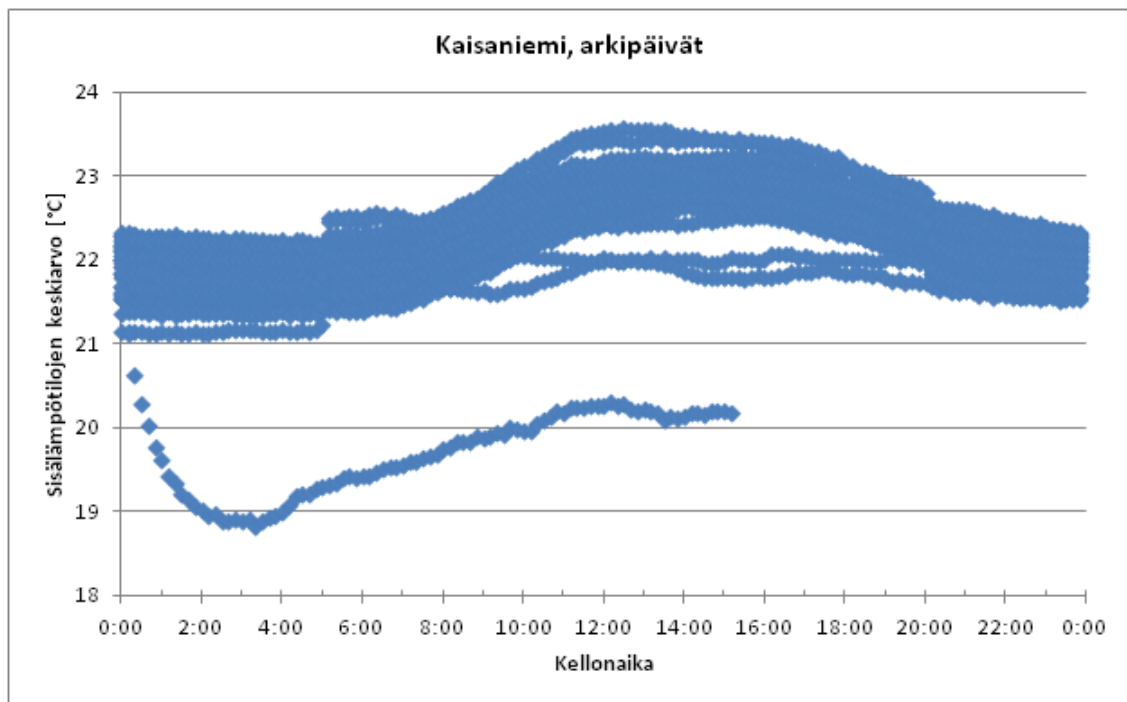
virka-aikana. Molemmissa kohteissa korkein lämpötila sijoittuu puolenpäivän tienoil- le ja matalimmat lämpötilat ovat aamuyöllä kahden ja kuuden välillä. Kuvat 13 ja 14 esittävät asuinkiinteistöistä mitattua dataa. Näistä ensimmäisessä huomataan selkeä trendi sisälämpötilan käyttäytymisessä, kun taas toisen datasta ei voi tulkita aukottomasti mitään. Jakomäen ensimmäisen kiinteistön kuvassa 13 nähdäänkin mi- ten sisälämpötila on selkeästi matalampi virka-aikoina. Sisälämpötilan korkein kohta löytyy kello 18 tienoilta ja matalimmat arvot on mitattu aamukahdeksan ja -kym- menen välillä. Jakomäen toisen kiinteistön kuvasta 14 voidaan todeta, että illalla kello 18 on huomattavissa hieman nousua sisälämpötilassa ja alimmillaan sisäläm- pötilat ovat aamuyöllä. Kuvan 12 data on tasainen kaikkina kellonaikoina, joten kauppakeskuksen lämpökäyttäytyminen ei riipu kellonajasta.

Kuviin 15 – 19 on piirretty vain arkipäiviin sijoittuvat sisälämpötila-arvot. Ku- vista voidaan tehdä samat havainnot kuin koko viikon datasta piirretyistä kuvista 10 – 14 sen suhteen miten sisälämpötilan maksimi- ja miniarvot riippuvat kellona- jasta. Kuitenkin kuvista 15 ja 16 voidaan todeta, että kelloajan vaikutus on arkena selvempi kuin viikonloppuisin. Tämän huomaa siitä, että korkeimpien sisälämpöti- lojen kelloaikojen matalampien lämpötilojen arvoja on karsiutunut pois. Kuvat 17 – 19 näyttävät, että Espoon kauppakeskuksen ja Jakomäen asuinkiinteistöjen ku- vaajat pysyivät huomattavan samanmuotoisina kuin kuvaajat, joissa on kaikkien vuorokausien tiedot.

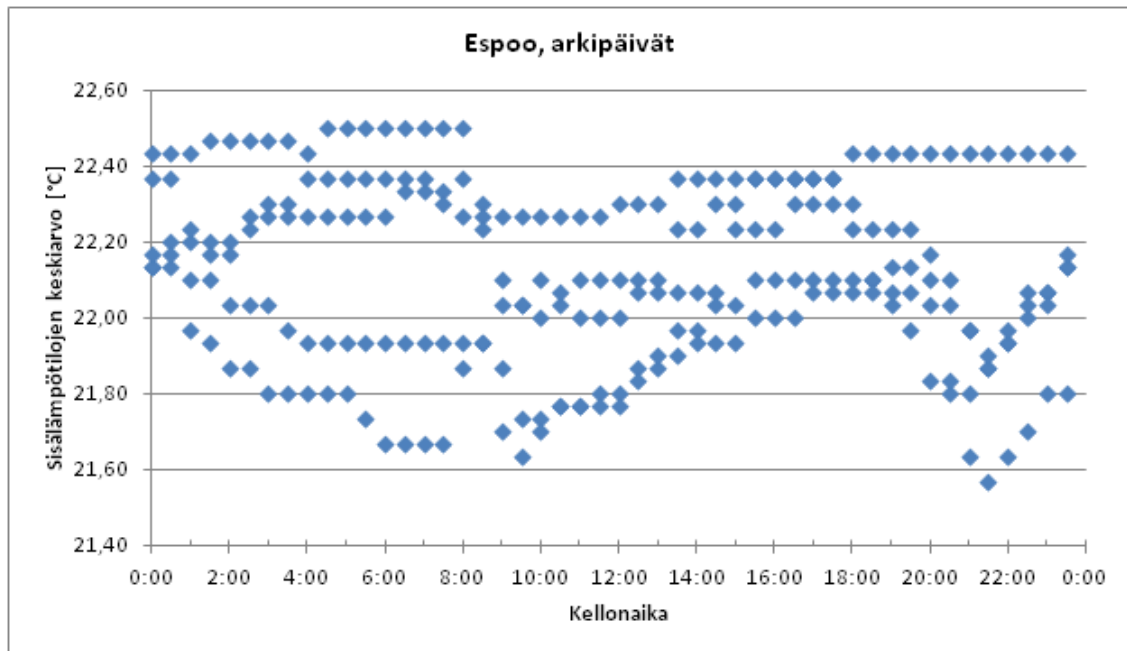
Kuvissa 20 – 24 esitetään vain viikonloppujen mittausten arvot. Kuvista huomai-



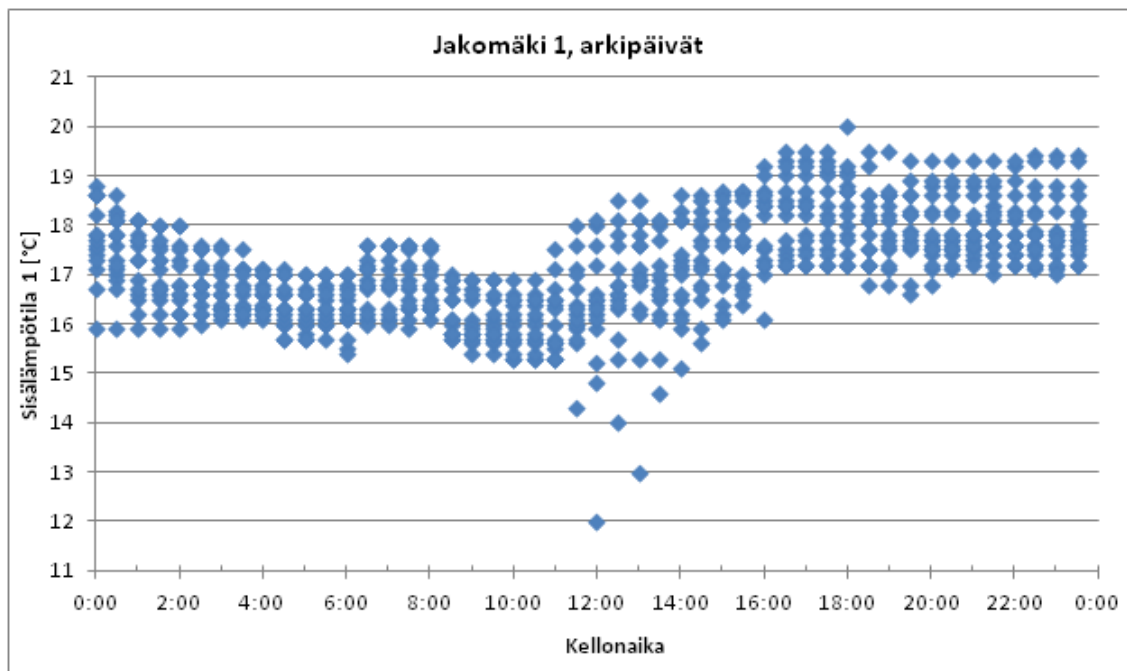
Kuva 15: Kallion koulun sisälämpötilan suhde kellonaikaan arkipäivinä ajanjaksolla 1.3. – 30.4.2012



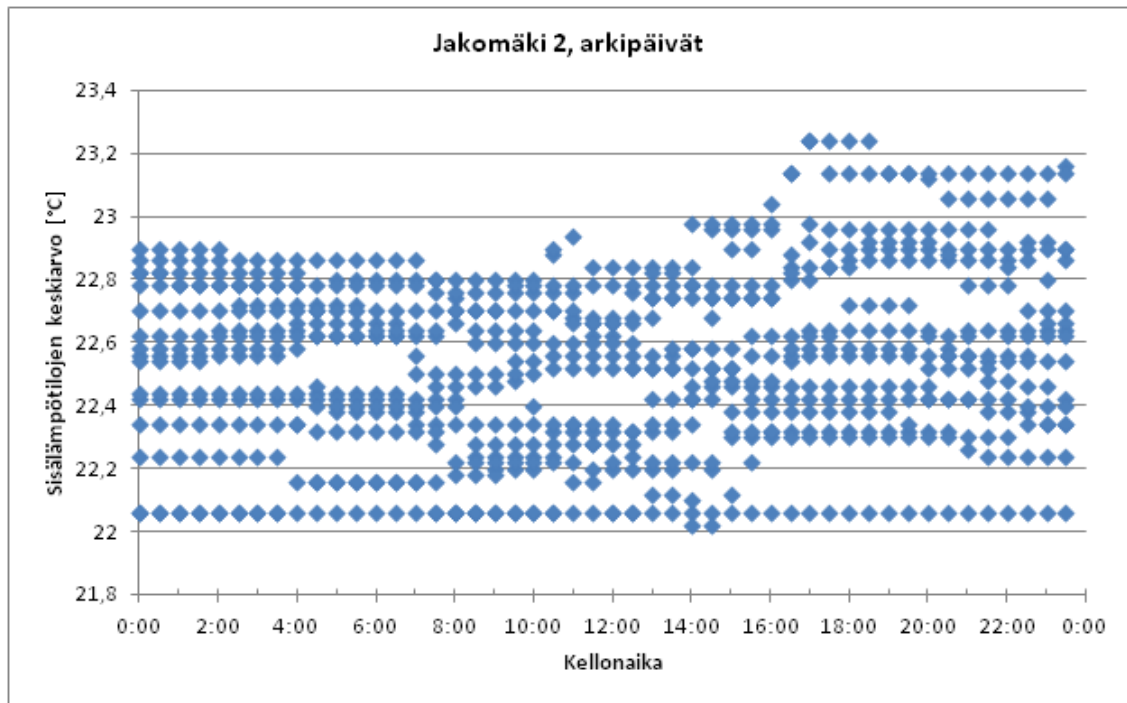
Kuva 16: Kaisaniemen toimistorakennuksen sisälämpötilan suhde kellonaikaan arkipäivinä ajanjaksolla 1.3. – 1.5.2012



Kuva 17: Espoon kauppakeskuksen sisälämpötilan suhde kellonaikaan arkipäivinä ajanjaksolla 30.4. – 6.5.2012



Kuva 18: Jakomäen ensimmäisen asuinkiinteistön sisälämpötilan suhde kellonaikaan arkipäivinä ajanjaksolla 9.4. – 30.4.2012

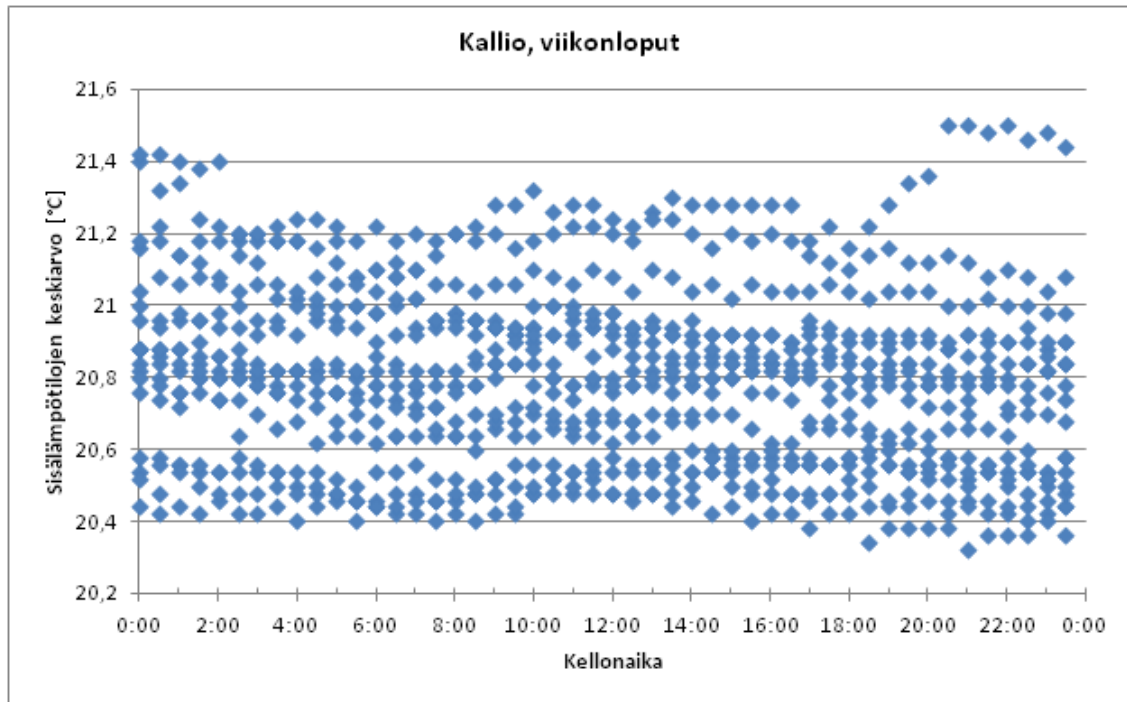


Kuva 19: Jakomäen toisen asuinkiinteistön sisälämpötilan suhde kellonaikaan arkipäivinä ajanjaksolla 9.4. – 30.4.2012

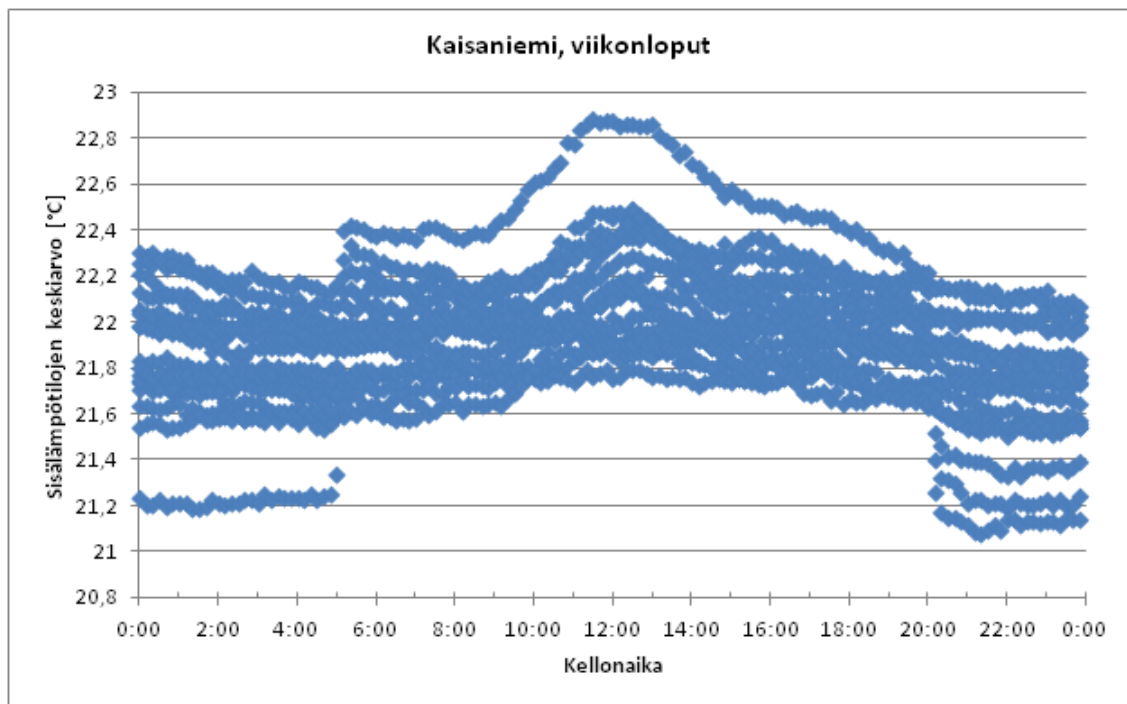
tavin on Kalliossa sijaitsevat koulun kuvaaja kuvassa 20, koska sen mittauspisteiden sijoittumisen ero arkipäivien arvojen sijoittumiseen on huomattava. Viikonloppujen mitatut arvot eivät näytä muodostavan minkäänlaista riippuvuutta kellonaikaan toisin kuin arkipäivien arvojen selkeä aaltomainen suhde kelloaikaan kuten kuvassa 15 näkyy. Muiden kohteiden viikonloppujen mittauspisteiden kuvaajat noudattavat huomattavan samaa muotoa kuin arkena.

Auringon säteilyn ja sisälämpötilan yhteys ei ole niin selkeä kuin kelloajan ja sisälämpötilan. Jonkinlaista riippuvuutta on kuitenkin huomattavissa. Kuvissa 25 – 29 on kuvattu sisälämpötilan ja auringon säteilyn suhdetta jokaisena päivänä. Lisäksi kuviin 30 – 34 ja kuviin 35 – 39 on eriytetty tilanteet arkipäivinä ja viikonloppuisin. Kuvien dataa ei ole rajattu ulkolämpötilan mukaan. Tutkimuksessa piirrettiin myös kuvaajat kapeilta ulkolämpötila-alueilta erikseen, mutta niiden ei todettu antavan lisäinformaatiota.

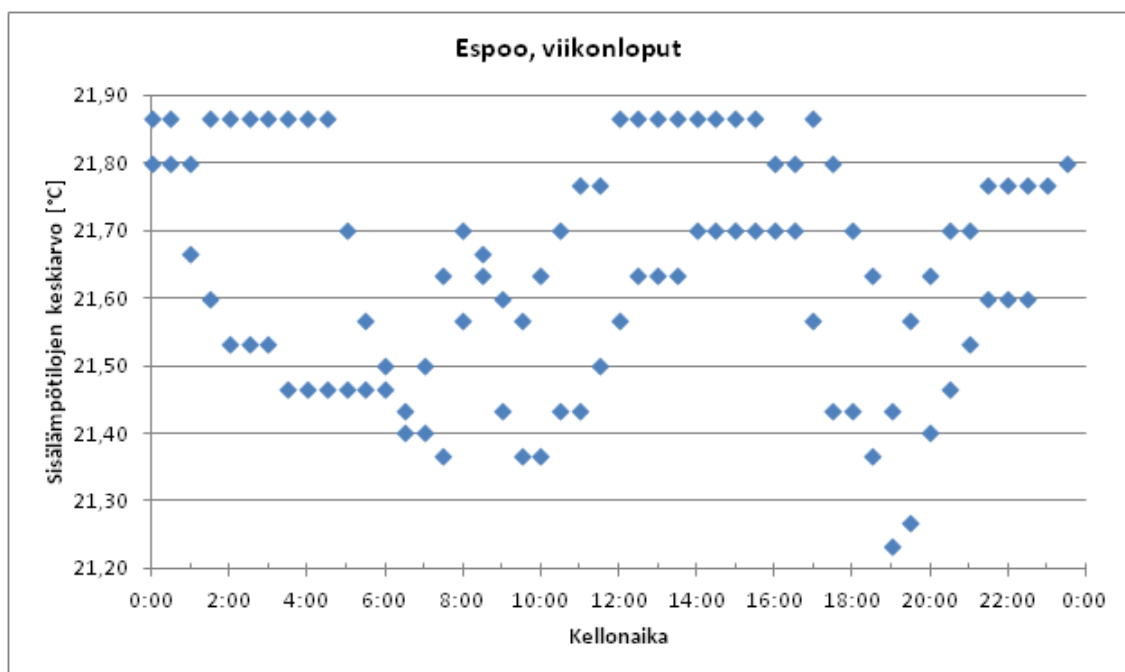
Kuvissa 25 – 29 esitetään kaikkien viikonpäivien sisälämpötilan ja auringon säteilyn suhde. Datasta ei voi aukottomasta päätellä mitään, mutta huomattavin havainto voidaan tehdä kuvista 25 – 27. Näistä Kallion koulun, Kaisaniemen toimistorakennuksen ja Espoon kauppakeskuksen kuvista on nähtävissä pistejoukon nousujohteisuus. Johteisuuden selkein aiheuttaja on, että auringon säteilyn ollessa korkea, ei sisälämpötila koskaan ole matala. Kuvista 28 ja 29 taas on vaikea tehdä minkäänlaisia havaintoja Jakomäen asuinrakennusten sisälämpötilan suhteesta auringon säteilyyn.



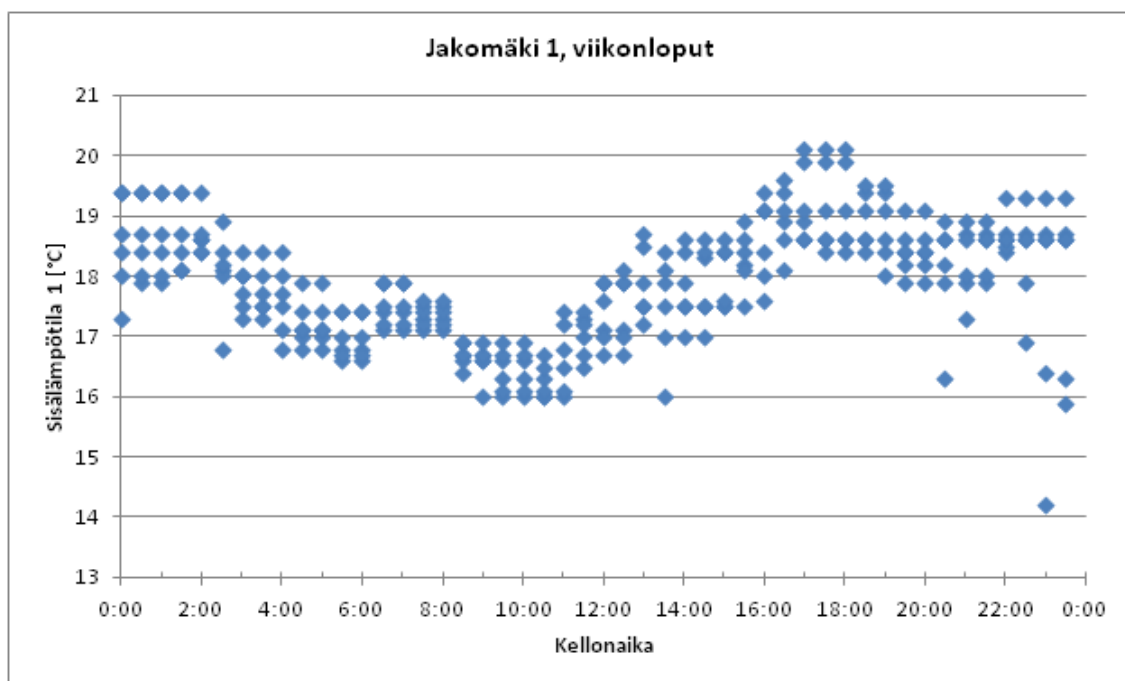
Kuva 20: Kallion koulun sisälämpötilan suhde kellonaikaan viikonloppuisin ajanjaksolla 1.3. – 30.4.2012



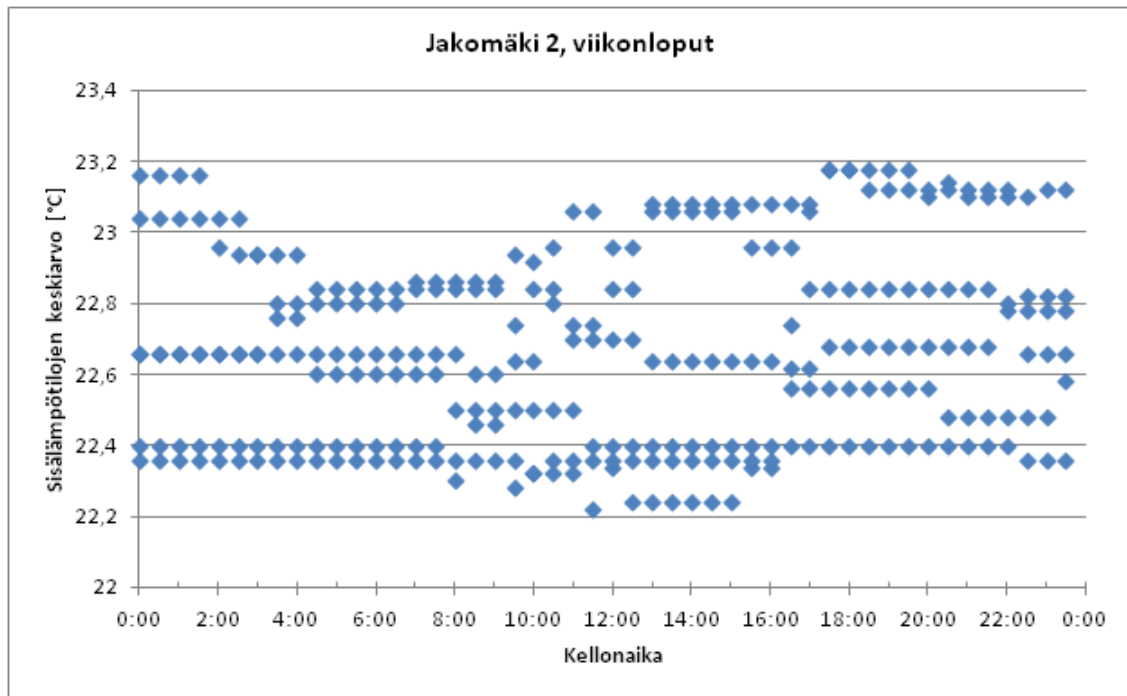
Kuva 21: Kaisaniemen toimistorakennuksen sisälämpötilan suhde kellonaikaan viikonloppuisin ajanjaksolla 1.3. – 1.5.2012



Kuva 22: Espoon kauppakeskuksen sisälämpötilan suhde kellonaikaan viikonloppuisin ajanjaksolla 30.4. – 6.5.2012



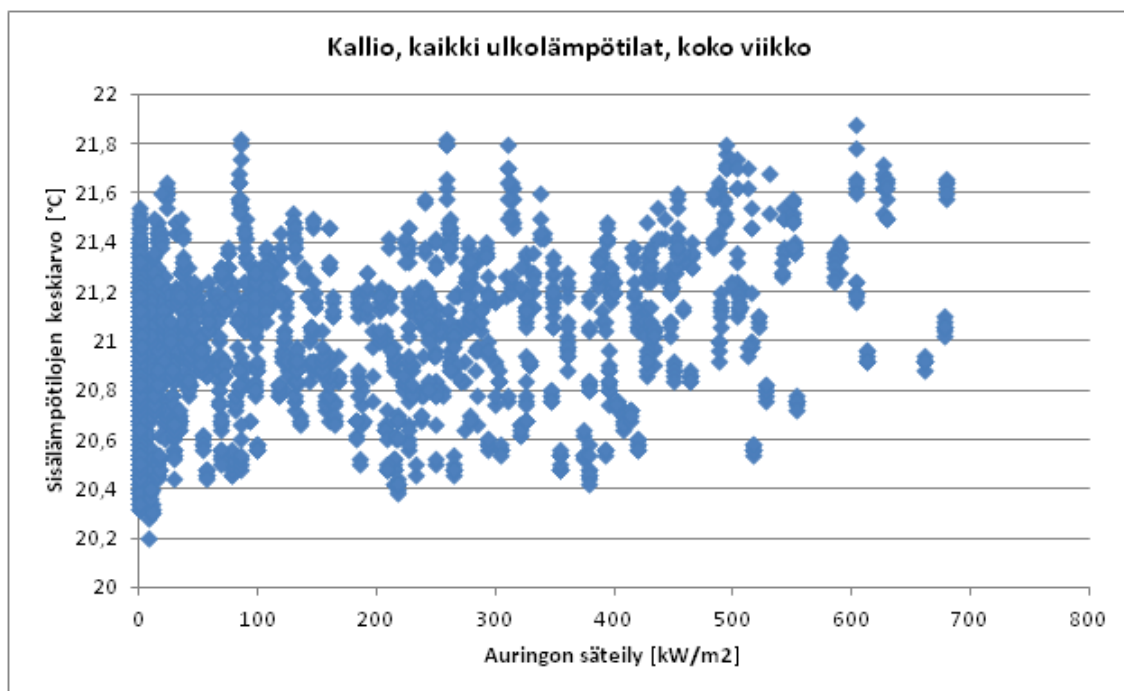
Kuva 23: Jakomäen ensimmäisen asuinkiinteistön sisälämpötilan suhde kellonaikaan viikonloppuisin ajanjaksolla 9.4. – 30.4.2012



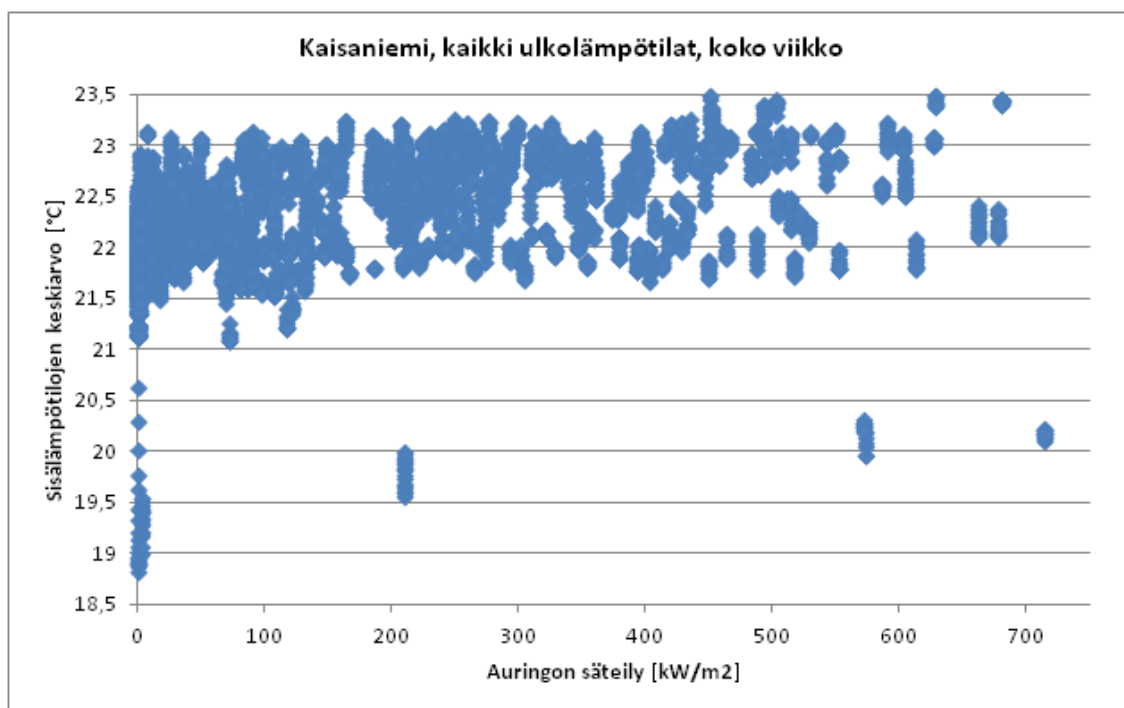
Kuva 24: Jakomäen toisen asuinkiinteistön sisälämpötilan suhde kellonaikaan viikonloppuisin ajanjaksolla 9.4. – 30.4.2012

Kuten sisälämpötilan ja kellonajan riippuvuuden kuvaajissa, myös näissä sisälämpötilan ja auringon säteilyn kuvaajissa on eritelty arkipäivien datat erikseen. Kuvat 30 – 34 esittävät juurikin näitä arkipäivien pistejoukkoja. Kaikkien viikonpäivien datasta tehty havainto pistejoukon nousujohteisuudesta korostuu entisestään kuvien 30 – 31 mukaan Kallion koulun ja Kaisaniemen toimistorakennuksen kohteissa. Espoon kauppakeskuksen datassa kuvassa 32 on myös huomattavissa sama trendi, ettei matalia lämpötiloja ole mitattu aurinkoisina hetkinä. Dataa on kuitenkin Espoon kohteesta sen verran vähän, että on vaikea muodostaa selkeää käsitystä pistejoukon muodosta. Kuten kaikkien päivien datassa, ei Jakomäen kohteissa kuvissa 33 ja 34 huomata selkeää riippuvuutta sisälämpötilan ja auringon säteilyn välillä.

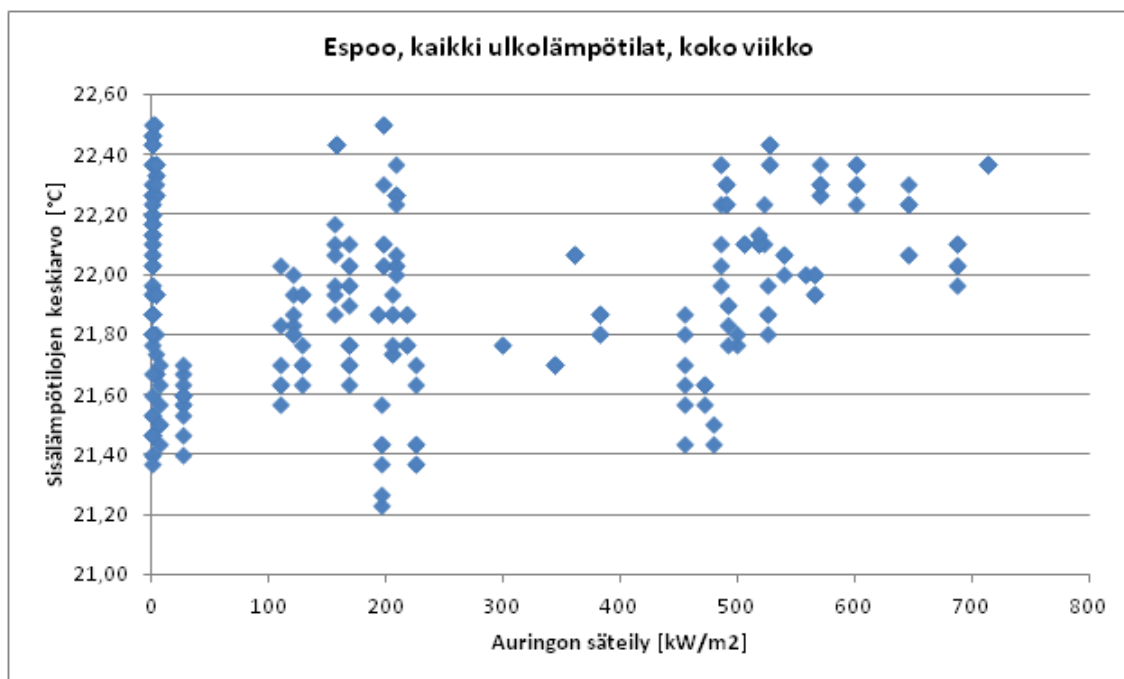
Viikonloppujen data sisälämpötilan ja auringon säteilyn suhteesta on eriytetty kuviin 35 – 39. Kaisaniemen toimistorakennuksen sisälämpötilojen suhde noudattaa samaa linjaa niin viikonloppuna kuin arkenakin, kuten kuvasta 36 voidaan todeta. Kallion koulun viikonloppuun data yllättää kuvassa 35. Aivan korkeimmilla auringon säteilyn arvoilla voidaan todeta myös sisälämpötilojen olevan korkeita. Odottamatonta oli kuitenkin, että keskivälin auringon säteilyn voimakkuuksilla sisälämpötilojen voidaan todeta olevan matalalla, kun taas auringon säteilyn pienentyessä lähemmäs nollaa, hajaantuvat sisälämpötila-arvojen pisteet tasaisesti koko vaihtelualueelle. Espoon kauppakeskuksen viikonloppuarvoista kuvassa 37 voidaan tulkitella vielä vähemmän kuin arjen mittauksista datan määrän vähentyessä entisestään. Jakomäen asuinrakennusten kuvaajat ovat yhtä vaikeatulkintaisia viikonloppuna kuvissa 38 ja 39 kuin arkenakin.



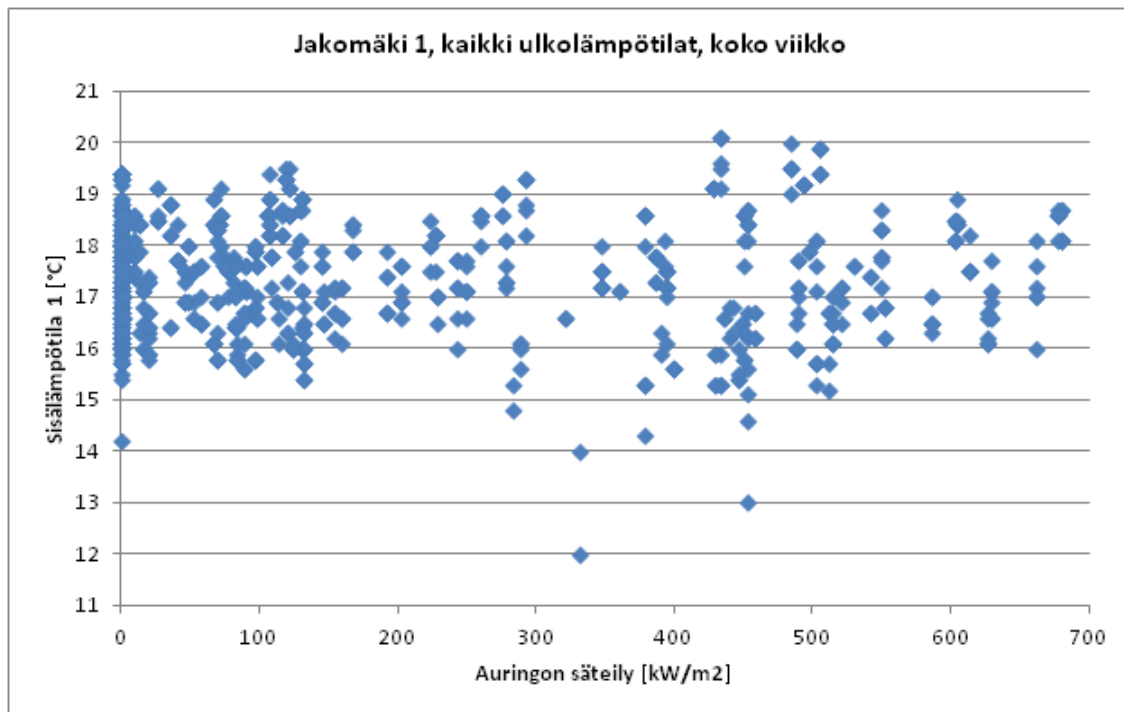
Kuva 25: Kallion koulun sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn ajanjaksolla 1.3. – 30.4.2012



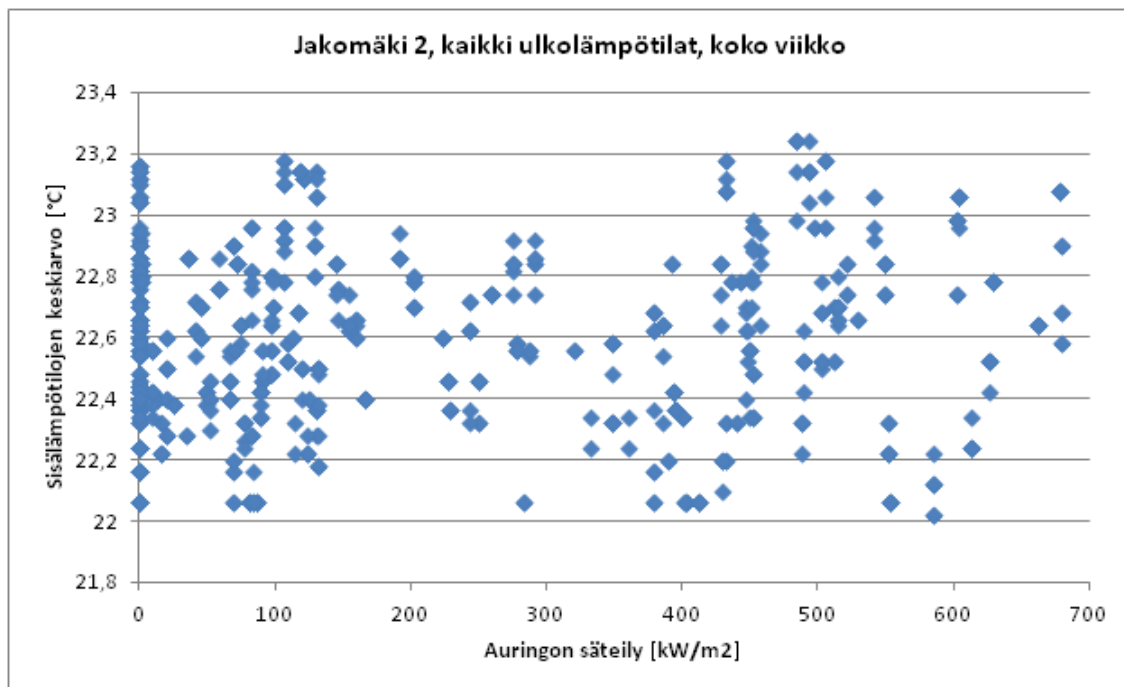
Kuva 26: Kaisaniemen toimistorakennuksen sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn ajanjaksolla 1.3. – 1.5.2012



Kuva 27: Espoon kauppakeskuksen sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn ajanjaksolla 30.4. – 6.5.2012



Kuva 28: Jakomäen ensimmäisen asuinkiinteistön sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn ajanjaksolla 9.4. – 30.4.2012

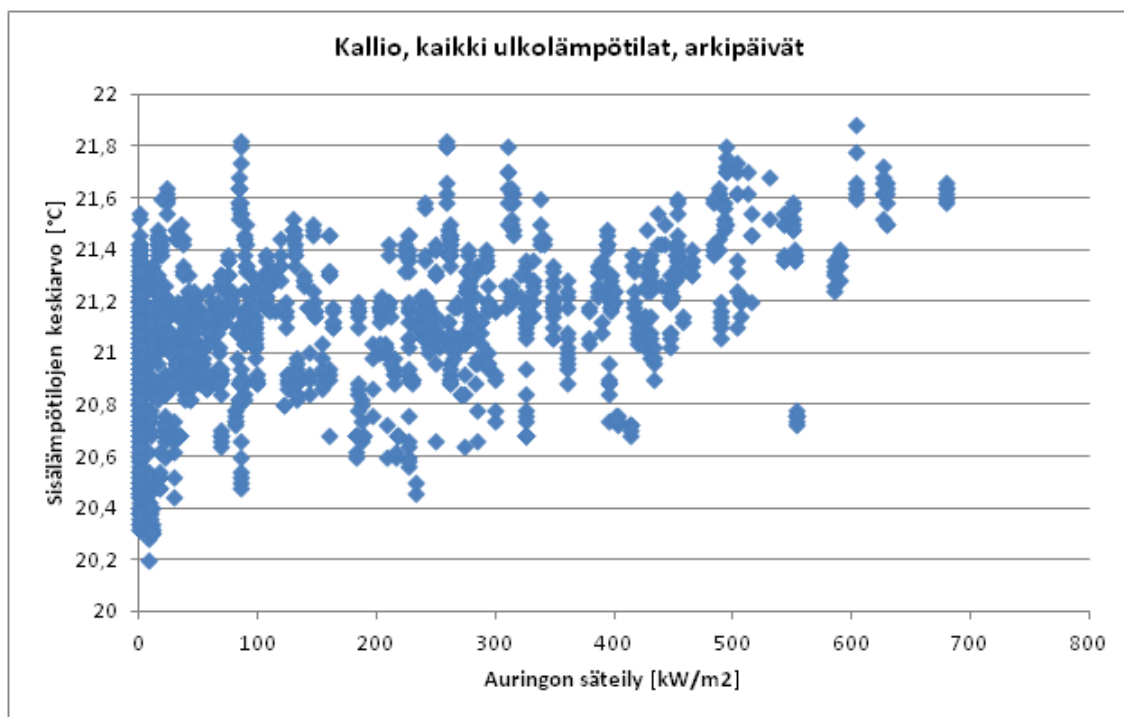


Kuva 29: Jakomäen toisen asuinkiinteistön sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn ajanjaksolla 9.4. – 30.4.2012

Kuten kuvaajien tulkinnessa on esitetty, on todennäköistä, että sisälämpötilan nousu aiheutuu osaltaan ihmisten oleskelusta, lämpimästä käyttövedestä ja sähkölaitteista. Kohteista ei saatu läsnäolotietoja, joten karkeaa arviota lämpökuorman koosta voitaisiin tehdä rakentamismääräyskokoelman D5 perusteella. Tietämättä rakennuksen fysikaalisia ominaisuuksia, on mahdoton päätellä kuinka suuren vaikutuksen nämä kuormat aiheuttaisivat sisälämpötilan nousuun.

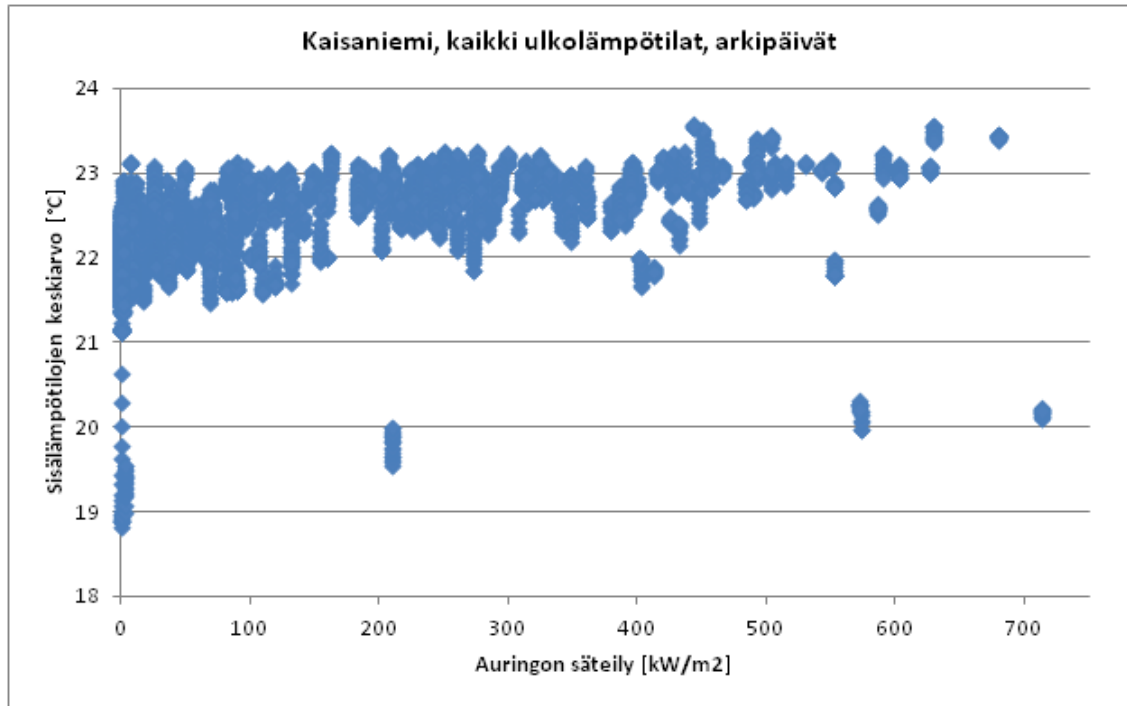
Kohteiden anturityyppejä ei saatu tietoon, joten tarkkoja kuvaajien virherajoja ei päästy määrittämään. Analyysin luonteeseen kuului kuitenkin kaikella datalla trendien hahmottaminen, joten yksittäisten pisteiden virherajat eivät olleet olennaista informaatiota. Yksittäisten pisteiden väärät arvot pystyttiin havaitsemaan joukosta ja systemaattisen virheen olemassaolo oli epäolennaista juurikin trendien tarkastelun vuoksi.

Forecalta ei myöskään saatu tietoa heidän toimittamiensa ennustetietojen varmuudesta ja toteutumistodennäköisyydestä. Analyyseissä hyödynnettiin kuitenkin vain sen hetkistä arvoa, jolloin virhe on huomattavan pieni. Ennusteilla katettiin suuriakin maantieteellisiä alueita ja niitä approksimoitiin tiettyjen havaintoasemien perusteella. Näin ollen juuri kyseessä olevien kohteiden toteutuneita säätietoja näiden arvojen avulla on mahdotonta arvioida. Säätietoja hyödynnettiin kuitenkin analyyseissä, joissa etsittiin rakennusten käyttäytymistrendejä ja eksaktit arvot ovat toissijaisia. Yksittäiset virhearvot pystyttiin arvioimaan pois analyysistä ja systemaattisen virheen mahdollinen olemassaolo oli epäolennaista, koska analyysi oli luonteeltaan trendejä etsivä.

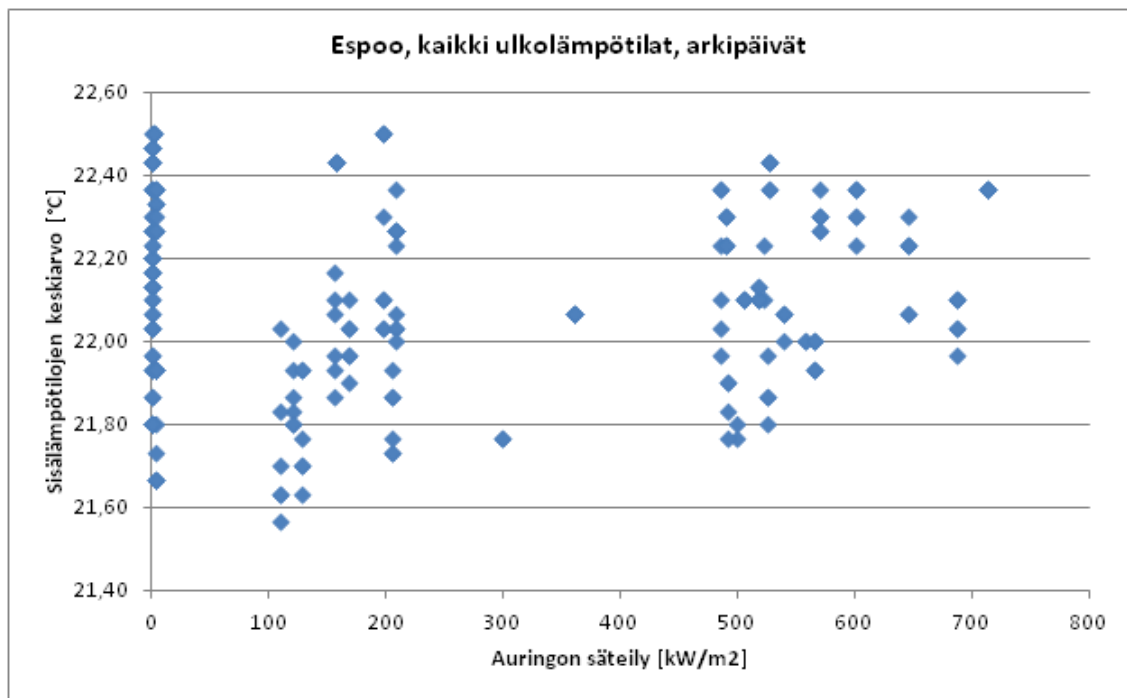


Kuva 30: Kallion koulun sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn arkipäivinä ajanjaksolla 1.3. – 30.4.2012

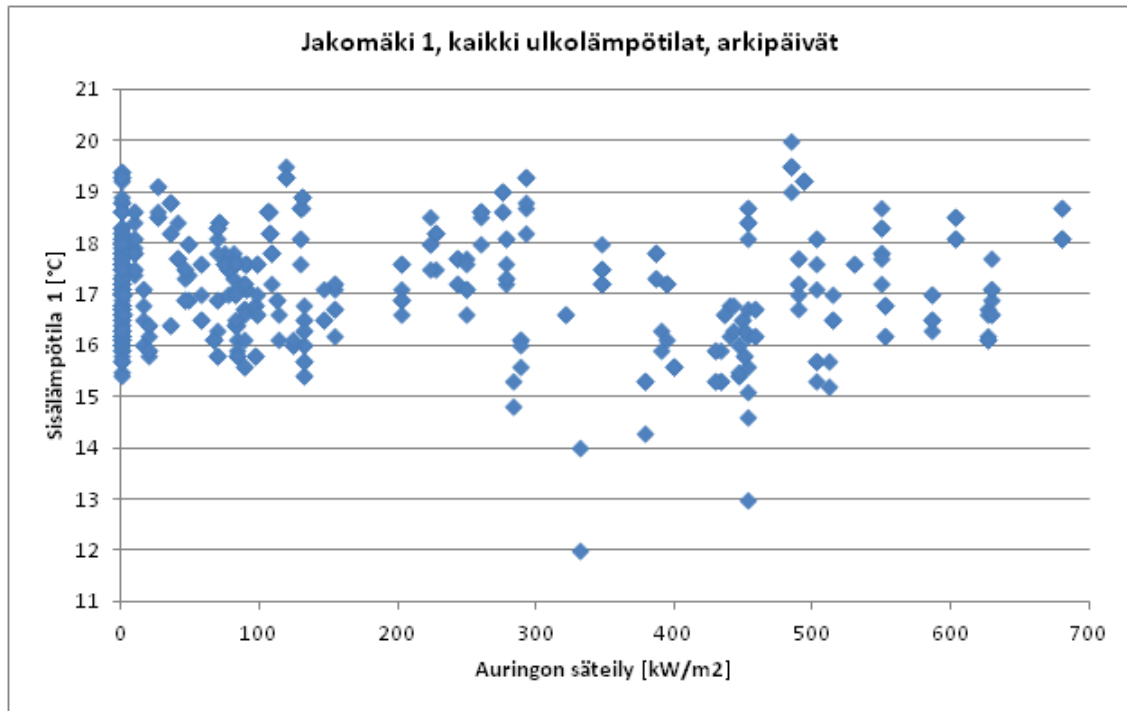
Huomattava havainto kuvien perusteella on, että kohteiden käyttäytymisessä on eroja. Sisälämpötila riippuu selkeästi kellonajasta vain osassa kohteissa ja sisälämpötilalla voidaan huomata olevan yhteyttä auringon säteilyyn vieläkin harvemmissa tapauksissa. Syysanalyysi sekä yksittäisille kuville, kohteille että ilmiöille on eritelty luvussa [3.1.3](#).



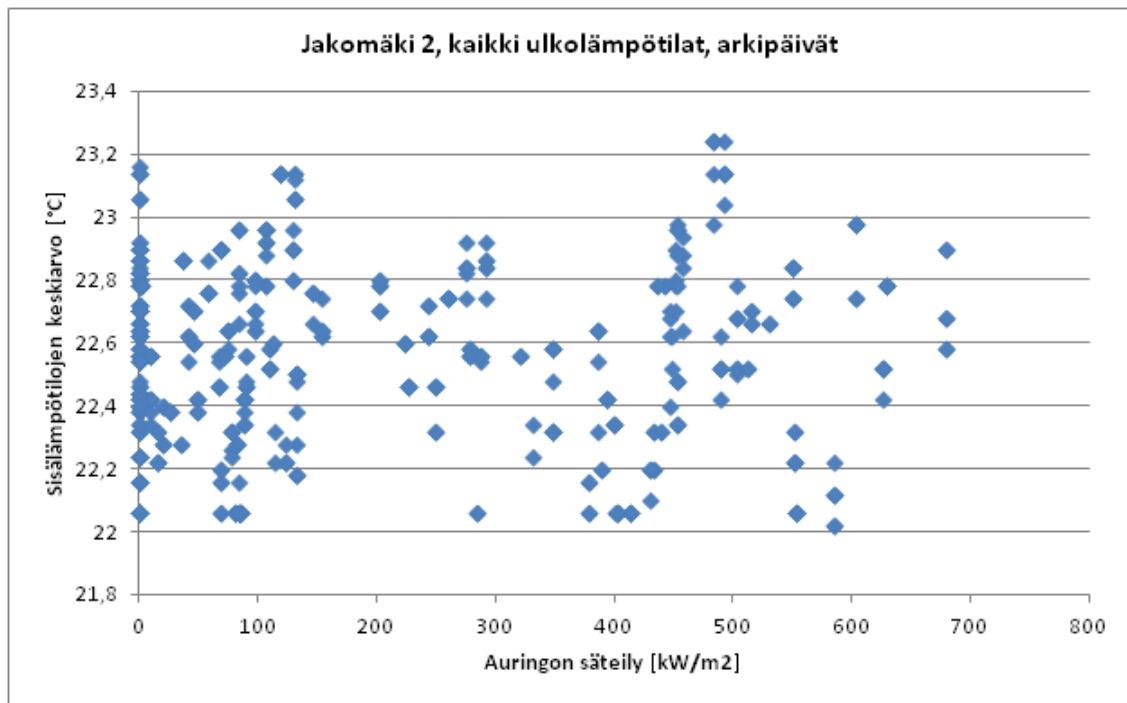
Kuva 31: Kaisaniemen toimistorakennuksen sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn arkipäivinä ajanjaksolla 1.3. – 1.5.2012



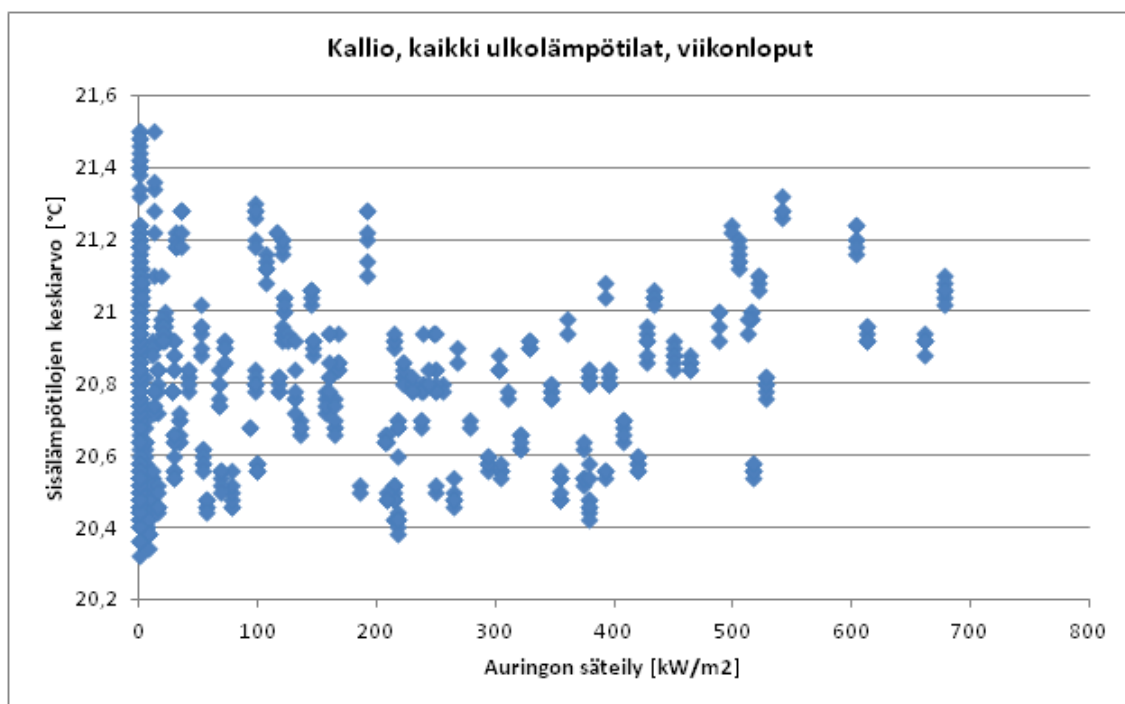
Kuva 32: Espoon kauppakeskuksen sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn arkipäivinä ajanjaksolla 30.4. – 6.5.2012



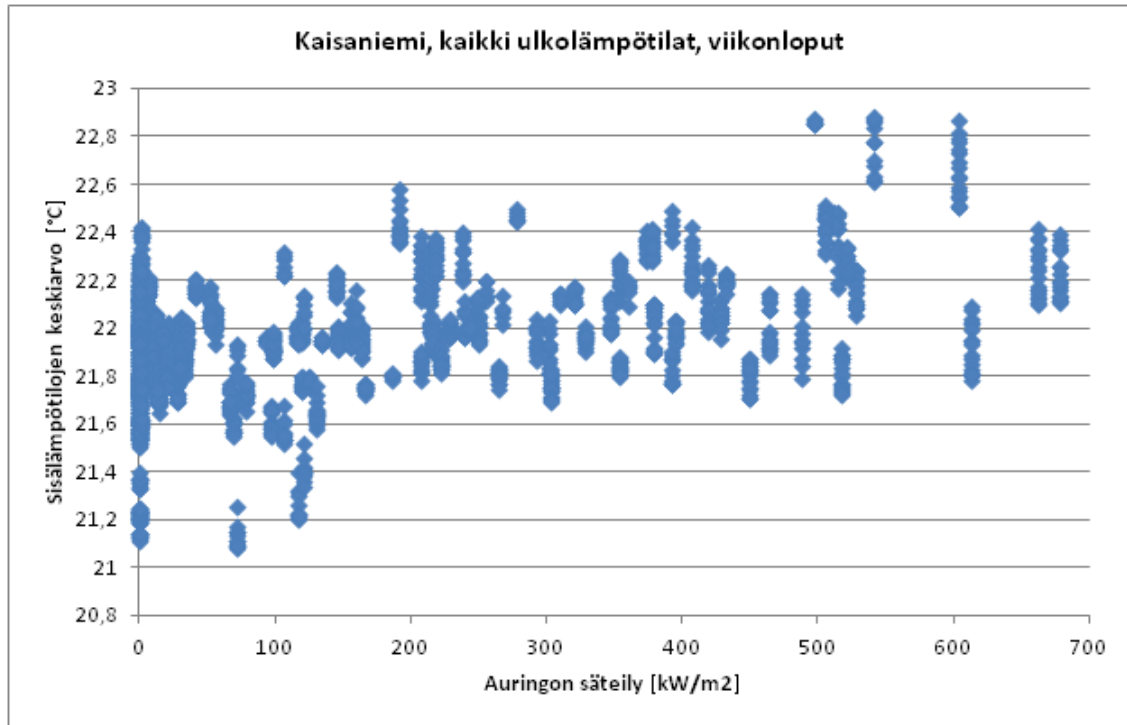
Kuva 33: Jakomäen ensimmäisen asuinkiinteistön sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn arkipäivinä ajanjaksolla 9.4. – 30.4.2012



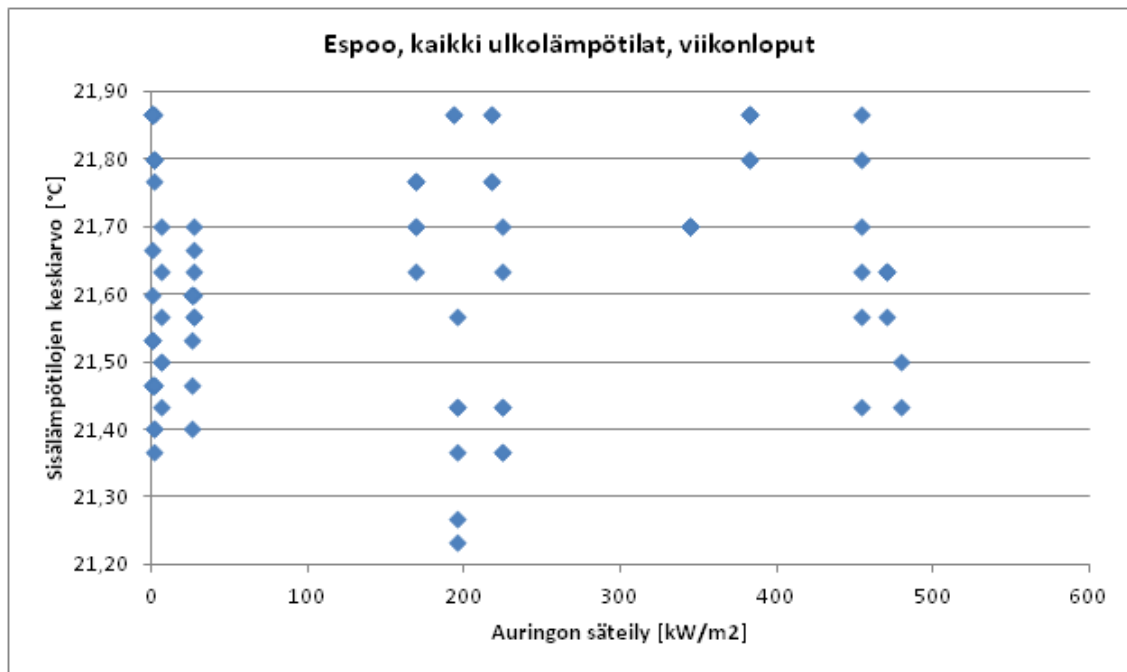
Kuva 34: Jakomäen toisen asuinkiinteistön sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn arkipäivinä ajanjaksolla 9.4. – 30.4.2012



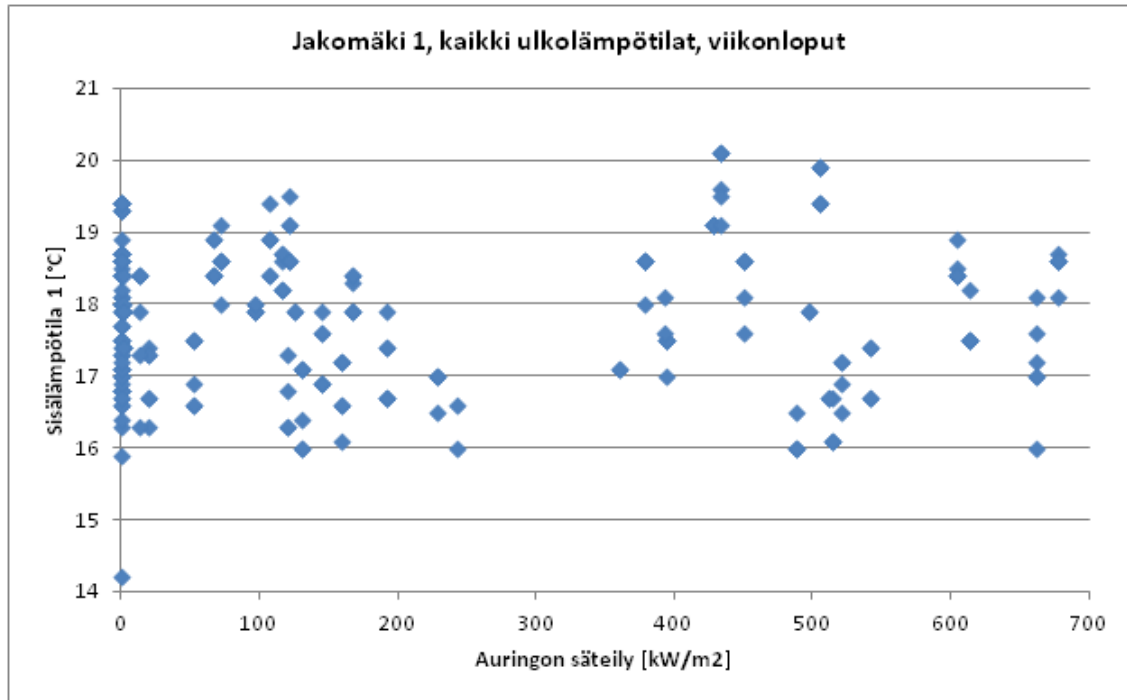
Kuva 35: Kallion koulun sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn viikonloppuisin ajanjaksolla 1.3. – 30.4.2012



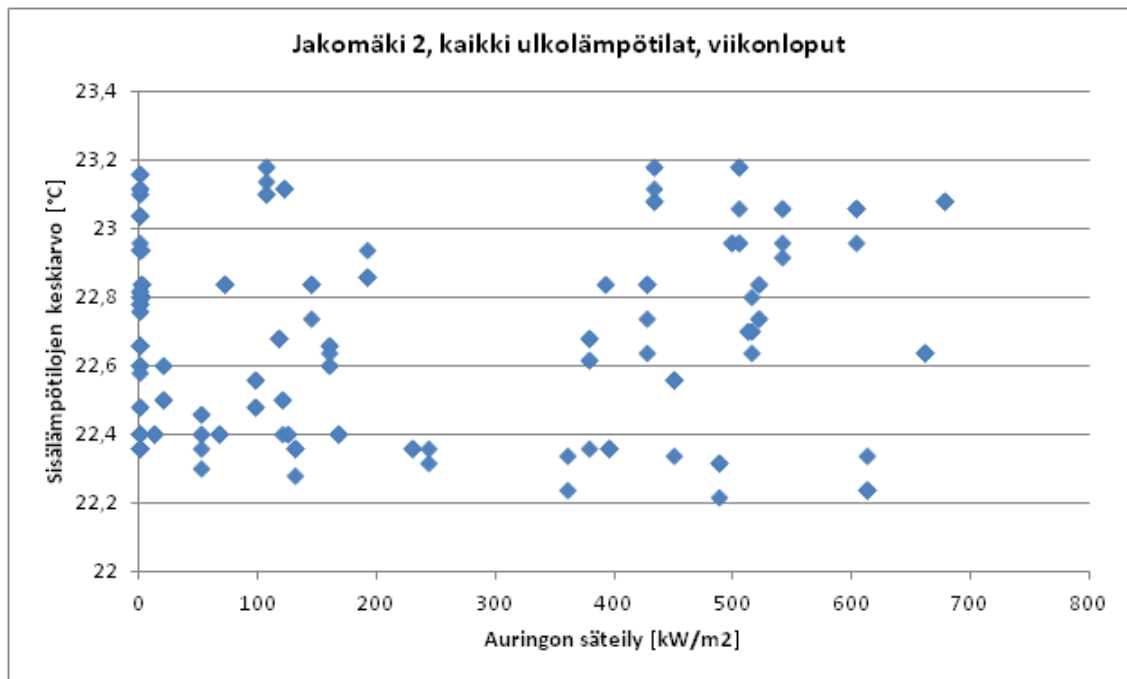
Kuva 36: Kaisaniemen toimistorakennuksen sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn viikonloppuisin ajanjaksolla 1.3. – 1.5.2012



Kuva 37: Espoon kauppakeskuksen sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn viikonloppuisin ajanjaksolla 30.4. – 6.5.2012



Kuva 38: Jakomäen ensimmäisen asuinkiinteistön sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn viikonloppuisin ajanjaksolla 9.4. – 30.4.2012



Kuva 39: Jakomäen toisen asuinkiinteistön sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn viikonloppuisin ajanjaksolla 9.4. – 30.4.2012

3.1.3 Tarkastelun johtopäätökset

Luvussa 3.1.2 esitellään viiden pääkaupunkiseudun kohteen datat sisälämpötilan suhteesta kellonaikaan ja auringon säteilyyn niin arkena kuin viikonloppunakin. Luvussa tarkastellaan sisälämpötilan käyttäytymistä kuvaajista. Selkein ja tärkeä huomio on, että kaikki kiinteistöt reagoivat eri tavalla. Sisälämpötilan käyttäytyminen kohteissa on erilaista ja riippuvuudet muihin tekijöihin ovat yksilöllisiä. Joissain kohteissa on huomattavissa lähes poikkeukseton trendi, kun taas toisissa riippuvuudet ovat suurpiirteisiä ja lopuista ei voida löytää minkäänlaista kaavaa.

Sisälämpötilan ja kellonajan riippuvuuden tarkastelussa huomattiin kolmessa kohteessa viidestä selkeä trendi, joka on kussakin uniikki. Näistä jokaisella rakennuksella on oma käyttötarkoituksensa ja trendien painotuksesta voidaan tulkita käytön vaikuttavan suuresti sisälämpötiloihin. Jokaisessa näistä kohteista sisälämpötilakäyrän muoto seuraa perinteistä aikataulumallia, joka liittyy kunkin rakennuksen käyttötarkoitukseen. Näissä kohteissa voidaan siis tulkita, että ihmisten läsnäololla on suuri vaikutus rakennuksen lämpenemiseen. Auringon vaikutusta on huomattavan vaikea aukottomasti määritellä minkään kohteen datasta. Erityisen hankalaa tulkinnaasta tekee, että tutkittaessa virka-aikana käytössä olevia rakennuksia, osuu ihmisten oleskelu ja auringon säteily suurelta osin samaan aikahaarukkaan. Tällöin pitää hyödyntää viikonloppudataa, jonka huomattavasti vähäisempi määrä lisää suuresti epävarmuutta.

Kalliossa sijaitsevan koulun (kuvat 10, 15 ja 20) lämpökäyttäytyminen suhteessa kellonaikaan on erittäin selkeästi nähtävissä sekä koko viikon että arkipäivien datassa. Koulurakennuksen käyttö sijoittuu perinteisesti arkisin klo 8 ja 17 välille ja tämän pystyy lukemaan kuvaajista helposti. Viikonlopun datassa ei ole huomattavissa trendiä, joten voidaan tulkita sisälämpötilan olevan huomattavan riippuvainen rakennuksessa oleskelusta. Kallion koulun sisälämpötilan riippuvuus auringon säteilystä (kuvat 25, 30 ja 35) ilmentää aiemmin esitettyä ongelmaa virka-aikaan käytettyjen rakennusten datan tulkinnasta. Koulua käytetään juurikin samoihin kelloaikoihin kuin aurinkoisuutta ilmenee ja näin ollen arkipäivien datasta ei voi tehdä suoria johtopäätöksiä. Viikonlopun aurinkoisuuskuvaajasta voidaan lukea, että kaikista aurinkoisimpina hetkinä sisälämpötilat ovat myös korkeita. Aurinkoisimpina päivinä ei kohteessa ole mitattu yhtään alhaista sisälämpötilaa. Tästä voidaan päätellä auringon tuottavan lämpökuormaa kiinteistölle. Näin ollen auringon vaikutus tulisi ottaa huomioon lämmityksen säädössä.

Kaisaniemen toimistorakennuksen (kuvat 11, 16 ja 21) sisälämpötilojen trendi on myös kytköksissä rakennuksen käyttöön. Kuten kouluakin, toimistorakennusta voidaan olettaa käytettävän arkisin klo 8 ja 17 välillä. Kuvaajista voidaan lukea juuri tästä aikahaarukasta sisälämpötilan nousu, jonka voidaan päätellä johtuvan tiloissa oleskelusta. Kallion koulun kuvaajista poiketen Kaisaniemen toimistorakennuksessa on huomattavissa myös viikonloppuisin samanmuotoinen trendi kuin arkisin. Kohteesta ei saatu läsnäolotietoja, mutta kohteen tiedetyn toimistoluonteisuuden takia voidaan olettaa, ettei rakennuksessa oleskella viikonloppuisin samoissa määrin kuin arkisin. Huomattavaa on siis, ettei datassa voida havaita minään päivänä yhtään matalia arvoja klo 8 ja 17 välillä. Kaisaniemen toimistorakennuksen auringon säteilyllä

ja sisälämpötilalla on selkeä yhteys (kuvat 26, 31 ja 36). Kaikkien päivien datasta ilmenee selvästi, miten aurinkoisina päivinä myös sisälämpötilat ovat korkeammat. Vaikka tulkittaisiin vain viikonlopun dataa, kuten Kallion koulun tapauksessa, on korkeiden auringon säteilyn hetkien aikana myös korkea sisälämpötila. Tästä voidaan tulkita, että Kaisaniemen kohteen sisälämpötila riippuu huomattavan vahvasti auringonpaisteesta. Lisäksi lämpötilaa toki nostaa viikonlopun aikana oletettavasti ilmanvaihdon kytkeytyminen pois päältä.

Myös Jakomäen ensimmäisen kiinteistön (kuvat 13, 18 ja 23) sisälämpötila käyttäytyy selvästi tietyn trendin mukaan suhteessa kellonaikaan. Kohde on asuinrakennus ja trendin käyttäytyminen on sen mukaista. Sisälämpötila laskee virka-ajoiksi, jolloin voidaan olettaa asukkaiden olevan ulkona kiinteistöstä. Myös viikonloppuisin sisälämpötila laskee päivisin, mikä voidaan laskea myös asukkaiden normaalin käyttäytymisen seuraamukseksi. Kohteen aurinkoisuuskuvaaajista (kuvat 28, 33 ja 38) huomataan, että auringon säteilyllä ei ole selvää yhteyttä sisälämpötilaan. On siis selkeää, että sisälämpötilan nousut johtuvat lähinnä ihmisten läsnäolosta ja oleskelun muista kuormista kuten sähkölaitteista.

Kaksi kohdetta kolmesta eivät osoita minkäänlaisen trendin mukaista käyttäytymistä. Espoossa sijaitsevan kauppakeskuksen (kuvat 12, 17 ja 22) sisälämpötilat eivät noudata oikeastaan minkäänlaista riippuvuutta kellonajasta. Kiinteistön sisälämpötilan ja auringon säteilyn välillä (kuvat 27, 32 ja 37) voidaan kuitenkin huomata yhteys ja kiinteistön sisälämpötilaan selkeästi vaikuttaa auringon aiheuttama lämpökuorma. Toinen kohteista, joissa ei voitu huomata kunnollista trendikäyttäytymistä, on Jakomäen toinen asuinkiinteistö. Kohteen sisälämpötilat eivät riippuneet kellonajasta (kuvat 14, 19 ja 24) eikä yhteyttä sisälämpötilan ja auringon säteilyn välillä voitu huomata (kuvat 29, 34 ja 39).

Sisälämpötilan riippumattomuus kellonajasta on hyvä asia, mikäli se on osoitus hyvästä lämmityksen säädöstä, lämpökuormien vähydestä tai lämpökuormien tasaisesta jakautumisesta. Jos sisälämpötila pysyy koko käyttöajan optimaalisella tasolla, on säätö rakennuksessa erittäin hyvä. Käyttöajan ulkopuolella voidaan energiansäästösyistä antaa lämpötilan muuttua vapaasti. Vähäisellä oleskelulla, pienellä määrällä sähkölaitteita ja auringon säteilyltä suojaamisella voidaan pitää sisälämpötilaan vaikuttavien lämpökuormien taso pienenä. Sisälämpötilan ollessa koko ajan korkea, on säätö jollain tavalla epäoptimi. Joko se on lähtökohtaisesti väärällä tasolla tai kiinteistössä on tasaisesti jakautunut lämpökuorma. Jakomäen toisen kiinteistön sisälämpötilat ovat tasaisesti huomattavan korkealla. Kyseessä on palvelutalo, joten on mahdollista, että vanhusten toivomuksesta näin on säädetty tarkoituksellisesti. Palvelutalossa voidaan tosin olettaa olevan koko ajan oleskelua ja näin ollen tasaisesti ympäri vuorokauden jakautunut lämpökuorma ja tämän takia sisälämpötila on noussut epätarkoituksenmukaisesti koko ajaksi liian korkeaksi. Espoon kauppakeskuksessa oletettavasti tasaisen sisälämpötilan aiheuttaa hyvin suunniteltu lämmitysjärjestelmä, koska siellä oleskelu on huomattavan vaihtelevaa.

3.2 Patteriverkoston ja sisälämpötilojen analysointi Vantaan konttorilla

Schneider Electric Buildingsin Vantaan konttorin kiinteistöautomaatiojärjestelmä on hyvä esimerkki pitkälle viedystä automaatiosta, joka muutaman loogisen virheen takia ei toimi optimaalisesti erilaisissa kuormitustilanteissa. Tämä luku käsittelee kohteen tietojen perusteella tehtyä analyysia säävaikutuksista, sisäisistä kuormista ja järjestelmän toimivuuden parantamisesta. Luvussa 3.2.1 kuvataan kohde ja sen automaatiojärjestelmä. Kohteesta mitattu data esitellään luvussa 3.2.2 ja datan tarkastelun johtopäätökset luvussa 3.2.3.

3.2.1 Kohteen, järjestelmän ja menetelmien kuvaus

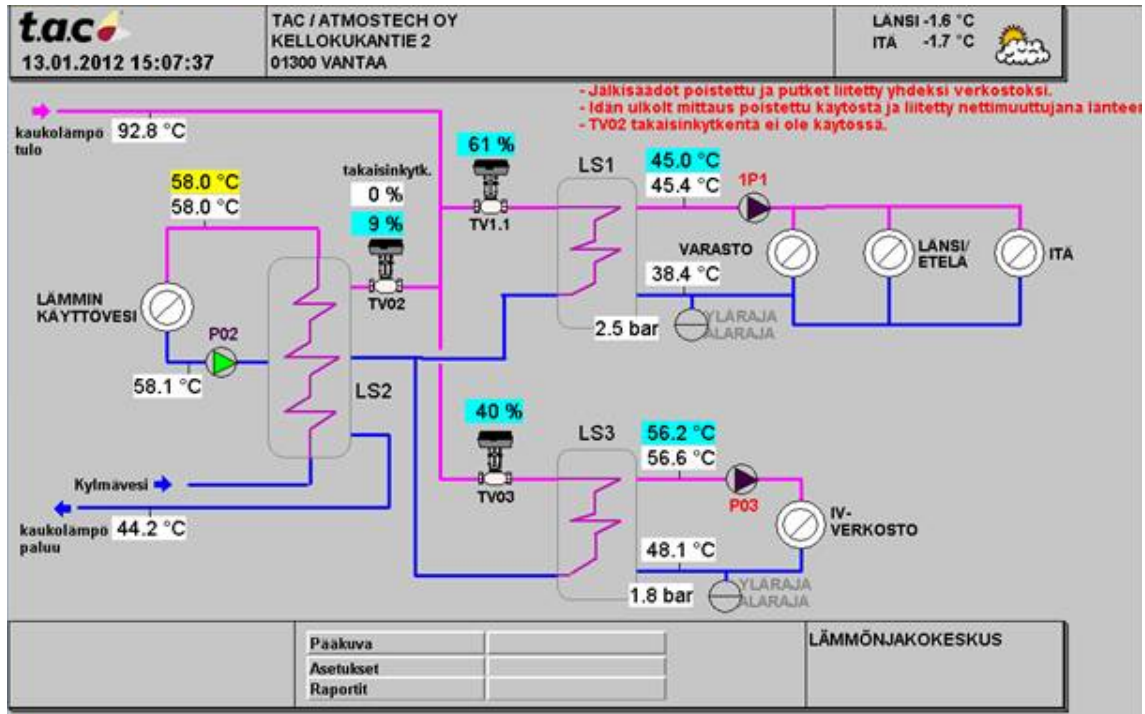
Tämä luku esittelee kohteena olevan Schneider Electric Buildingsin Vantaan konttorin. Luvussa esitellään kiinteistö ja järjestelmät.

Schneider Electric Buildingsin Finlandin Vantaan konttori sijaitsee Koivuhaassa Kellokukantiellä. Kyseessä on kaksikerroksinen rakennus, jossa on lisäksi kellari kokous- ja saunatilakäytössä. Koko rakennus on Schneider Electricin käytössä ja kaikki tilat ovat yhteydessä toisiinsa. Tilojen kokonaispinta-ala on noin 2500 neliometriä ja toimistossa työskentelee noin 100 henkilöä.

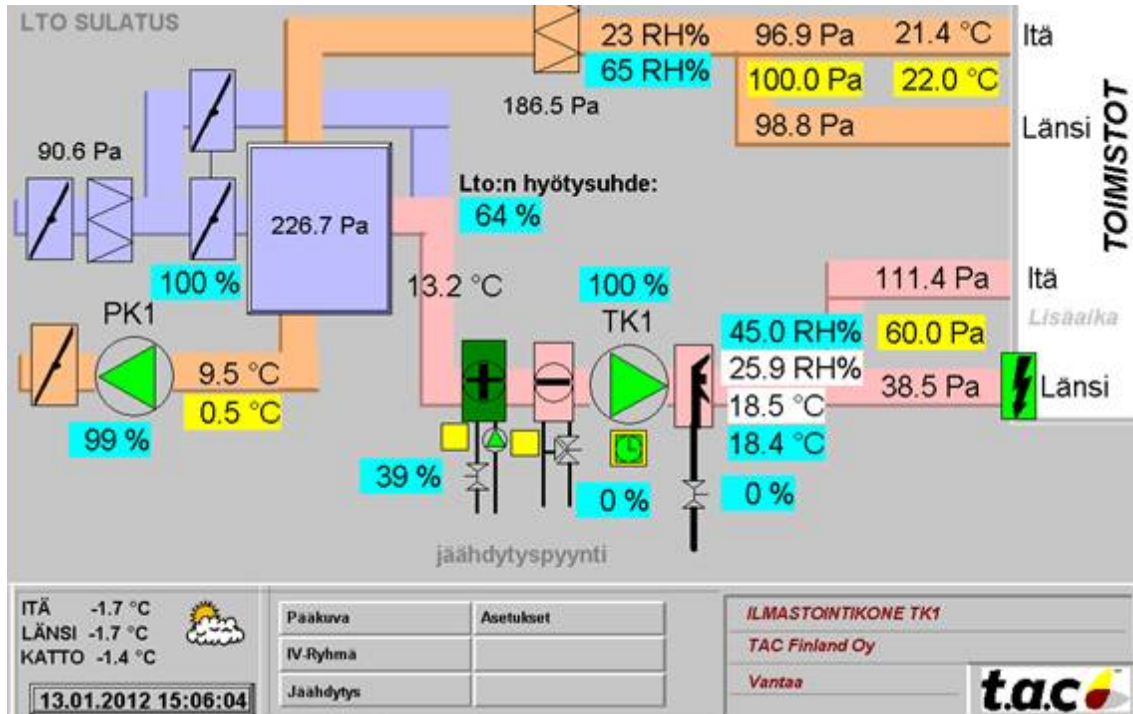
Kohteessa mitattiin 15 minuutin välein sisälämpötila 47 eri pisteessä, ulkolämpötila ja sähkönkulutus. Ilmanvaihtokoneiden säätöviestit, huoneiden sisään- ja ulospuhalluslämpötilat sekä lämmöntalteenoton ennen ja jälkeen lämpötilat mitattiin myös vartin välein. Lisäksi viiden minuutin välein mitattiin patteriverkoston ja ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin virtaamat sekä meno- ja paluuviesien lämpötilat. Mittausdata on ajalta 28.2. – 23.4.2012. Kuten luvun 3.1 tarkastelluissa kohteissa, on myös Vantaan konttorin säätiedot saatu Forecalta. Tunnin välein saatiin tunnitainen ennuste kolmelle vuorokaudelle ulkolämpötilasta, aurinkoisuudesta, pilvisyydestä, sateen todennäköisyydestä, tuulisuudesta, tuulen suunnasta ja suhteellisesta kosteudesta. Datan ensimmäisen eli kuluvan ennustetunnin arvot ovat approksimaatioita, jotka ovat muodostettu automaattisesti havainnoista ja täsmennetty meteorologin korjausten mukaan. Konttorin lämpötase muotoutuu lämmityksestä, ilmanvaihdosta, lämpimästä käyttövedestä, sähkökuormasta, ihmisten tuomasta kuormasta ja ilmaisenergioista.

Konttorissa on käytössä vesikiertoinen patteriverkosto, jota lämmitetään kaukolämmöllä. Samoin myös lämminkäyttövesi sekä ilmanvaihdon lämmityspatterit lämmitetään kaukolämmöllä. Kaukolämmitys on havainnollistettu valvomokuvassa 40. Ilmanvaihtokoneita rakennuksessa on neljä. Suurin niistä on lämmöntalteenotolla varustettu ja se vaihtaa työskentelytilojen ilman. Lisäksi saunatilalla, teknisellä tilalla ja varastolla on omat koneensa. Valvomokuvissa 41 – 44 nähdään ilmanvaihtokoneiden toimintaperiaatteet.

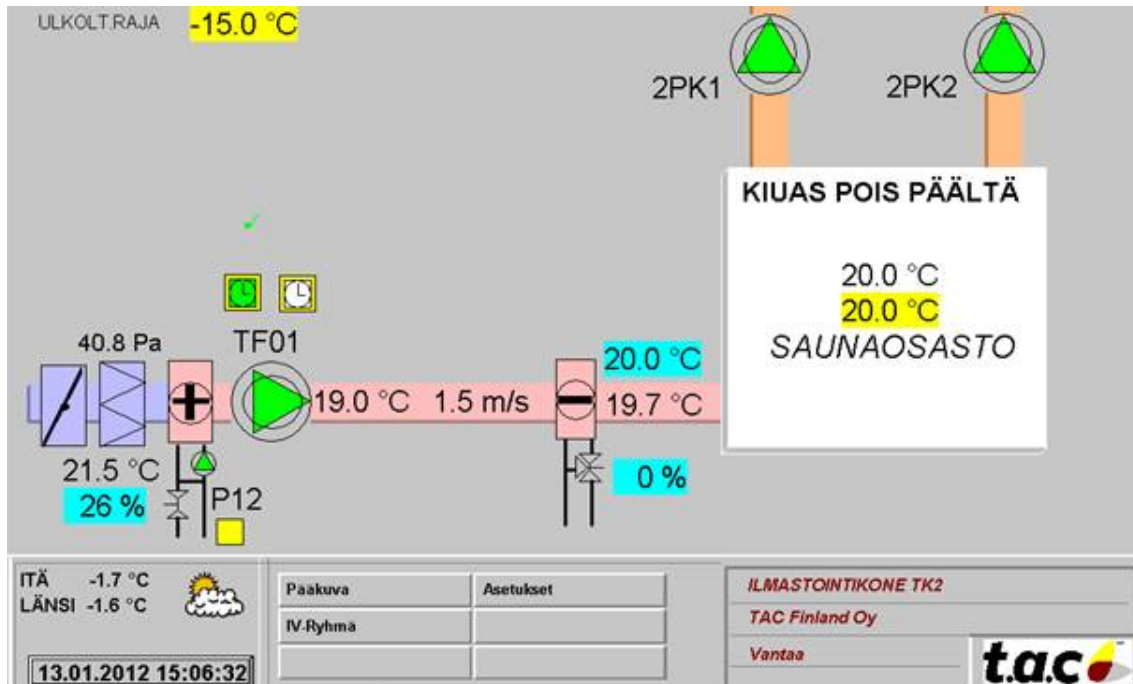
Kuvassa 40 nähdään konttorin kaukolämmityksen periaate. Violetilla on merkitty kaukolämmön tulovesi sekä osajärjestelmien menovedet ja sinisellä taas kaukolämmön ja osajärjestelmien paluuedet. Oikeassa yläkulmassa on esitetty kaukolämmön ja patteriverkoston lämmönsiirto ja patteriverkoston periaate. Menoveden lämpötila



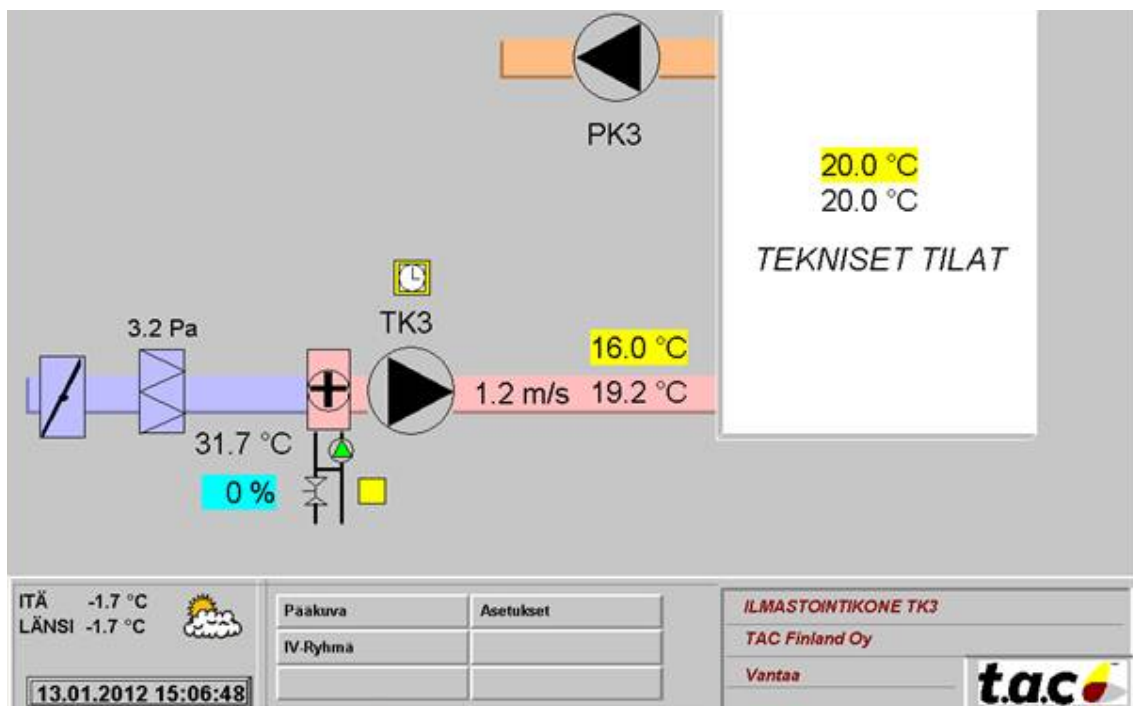
Kuva 40: Schneider Electricin Vantaan konttorin kaukolämmityksen prosessikaavio



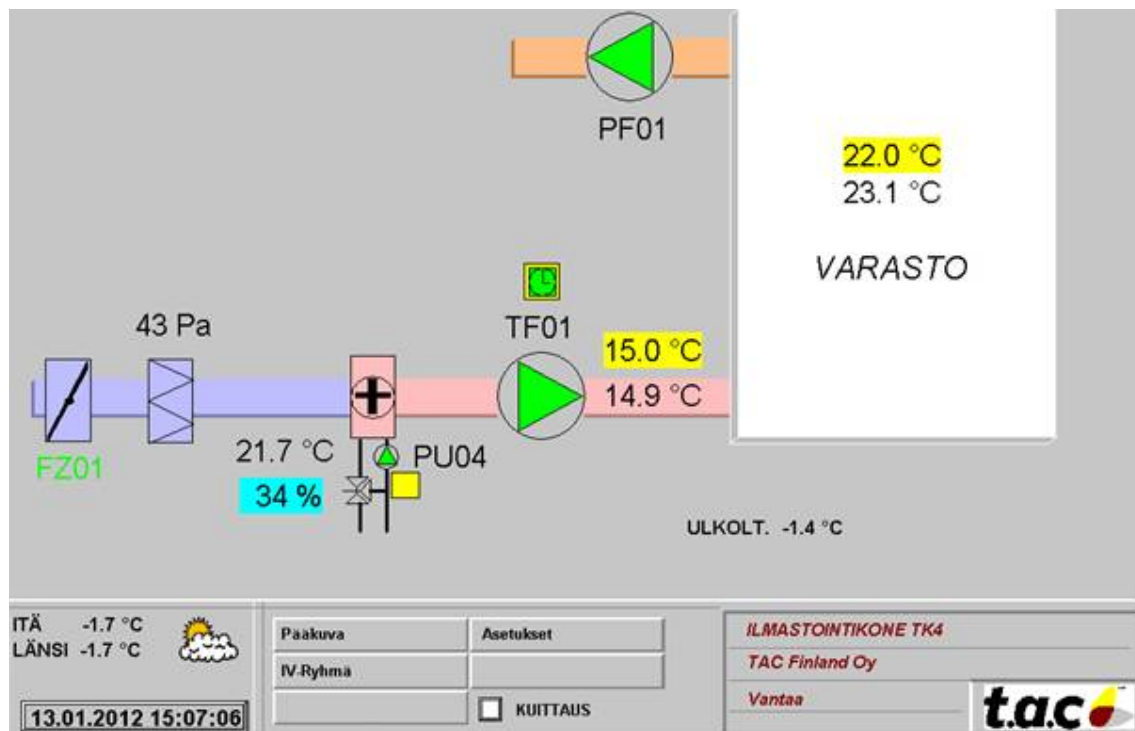
Kuva 41: Schneider Electricin Vantaan konttorin toimistotilojen ilmanvaihtokoneen prosessikaavio



Kuva 42: Schneider Electricin Vantaan konttorin saunatilojen ilmanvaihtokoneen prosessikaavio



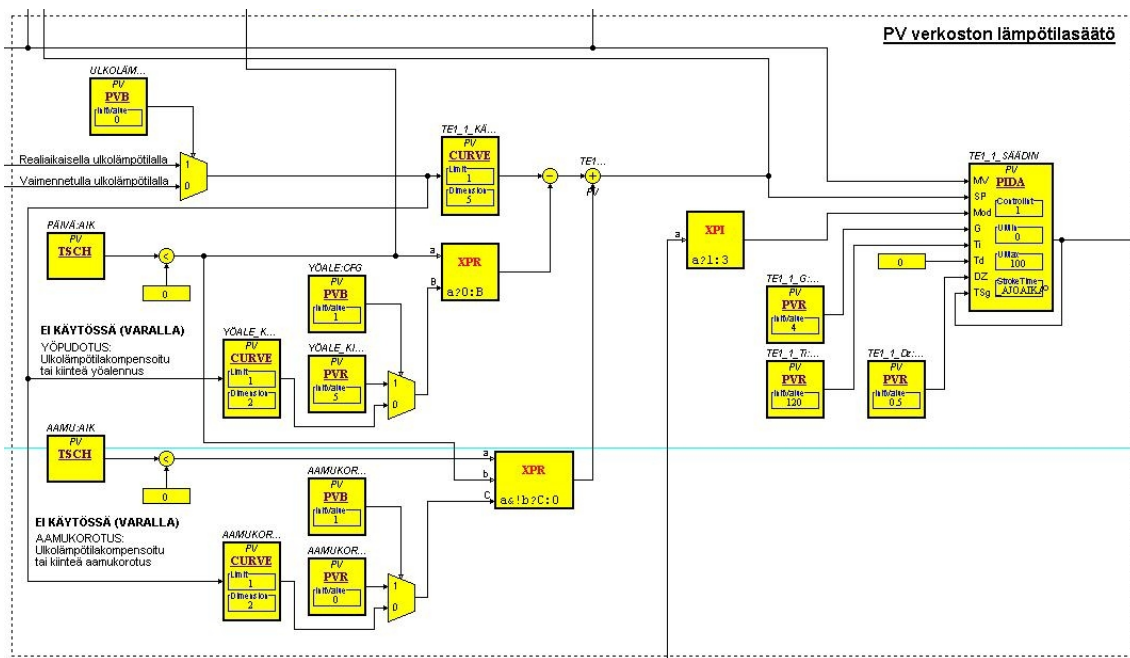
Kuva 43: Schneider Electricin Vantaan konttorin teknisten tilojen ilmanvaihtokoneen prosessikaavio



Kuva 44: Schneider Electricin Vantaan konttorin varaston ilmanvaihtokoneen prosessikaavio

mitataan juuri lämmönsiirtimen jälkeen ja paluuveden lämpötila taas juuri ennen lämmönsiirrintä. Patteriverkosto on jaettu kolmeen alaverkostoon, jotka kulkevat varastossa, länsi-/eteläpuolella rakennusta ja rakennuksen itäosassa.

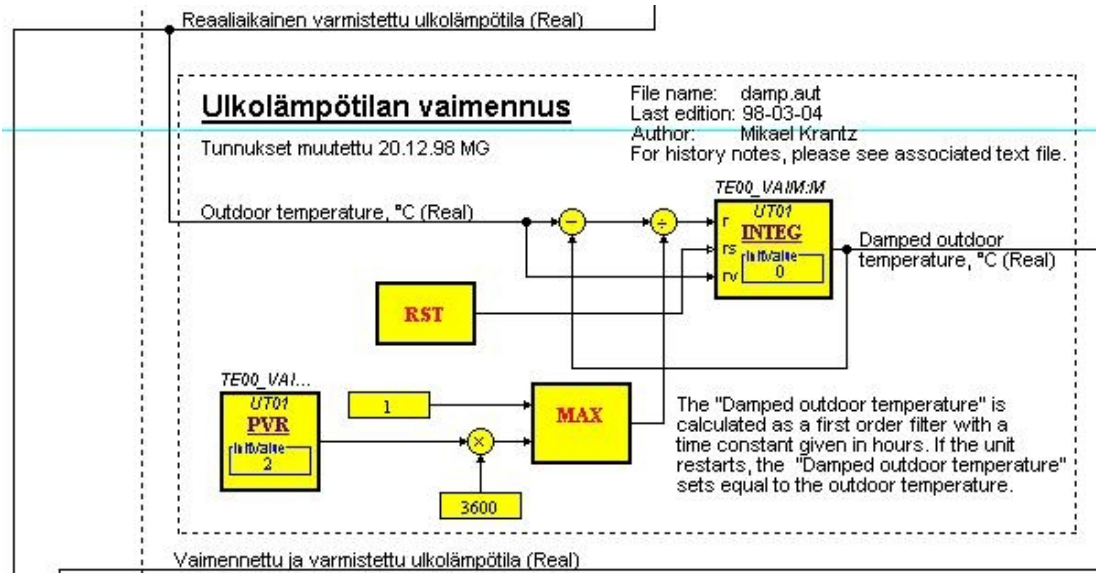
Patteriverkoston menoveden lämpötilan säätö tapahtuu Vantaan konttorilla perinteisellä tavalla ja tämä voidaan tulkita myös Schneider Electricin oman rakennus-automaatio-ohjelman Mentan logiikkakuvasta 45. Sekä kiinteän arvon että käyräperusteisen yöpudotuksen ja aamunoston logiikat on ohjelmoitu valmiiksi ohjelmaan. Yöpudotuksen kiinteän arvon logiikkaa hyödynnetäänkin järjestelmässä viikonloppupudotuksena. TSCH-lohkolla annetaan järjestelmälle päiväaika, joka on maanantaista klo 00.00 perjantaihin klo 17.00 asti. Tämän ulkopuolella tiputetaan menoveden lämpötilaa kiinteä 5°C . Ulkolämpötilana käytetään vaimennettua lämpötilaa, joka on selitetty myöhemmin tarkemmin. Itse säätö tapahtuu normaalilla PID-säätimellä, jossa D-termi on asetettu nolaksi. Ohjaussuurena (SP) tuodaan säätimelle vaimennetun lämpötilan mukaan asetusarvokäyrältä valittu arvo ja menoveden nykyinen mitattu lämpötila tuodaan sisääntulona MV-porttiin. Asetusarvokäyrä määritellään lohossa CURVE ja käyrän leikkauspisteet ovat -27°C : 65°C , -15°C : 60°C , -5°C : 50°C , $+5^{\circ}\text{C}$: 35°C ja $+20^{\circ}\text{C}$: 20°C .



Kuva 45: Schneider Electricin Vantaan konttorin lämmityksen säätökaavio

Rakennuksen lämmitystä on pyritty säätämään asettamalla ulkolämpötilalle vaimennusta. Kuvassa 46 on havainnollistettu, miten Menta-ohjelmaan on lisätty ulkolämpötilatiedolle logiikka, joka vaimentaa signaalia ennen kuin se annetaan säätimille syötteenä todellisen ulkolämpötilan tilalta. Vaimennettu ulkolämpötila lasketaan aikavakion avulla ensimmäisen kertaluvun suotimessa. Aikavakio asetetaan PVR-lohkossa tunteina ja muutetaan tämän jälkeen sekunneiksi. MAX-lohkossa varmistetaan, että aikavakion pituus on vähintään yksi sekunti. INTEG-lohko voidaan rese-

toida silloisen mitatun ulkolämpötilan arvoon antamalla reset-syötteeksi 1. Vaimennettu ulkolämpötila käyttäytyy niin, että todellisen ulkolämpötilan pysyessä vakiona pysyy vaimennettu signaali samassa arvossa ja todellisen ulkolämpötilan muuttuessa seuraa vaimennettu signaali sitä poikkeamalla, joka kasvaa muutosnopeuden noustessa.



Kuva 46: Schneider Electricin Vantaan konttorin ulkolämpötilan vaimennuslogiikan kaavio

3.2.2 Datan tarkastelu

Tässä luvussa tarkastellaan Vantaan konttorin dataa, tutkitaan kuvaajia ja esitellään ilmiöitä. Tarkemmat tulkinnot ja johtopäätökset tehdään luvussa 3.2.3.

Vantaan konttorin datan tarkastelulla pyrittiin selvittämään lämmitysjärjestelmän toimivuutta. Huomio kiinnitettiin aluksi yhtäläisyyksiin patteriverkoston menoveden lämpötilan ja patteriverkoston kuluttaman tehon välillä, minkä tarkoituksena oli myöhemmin selvittää menoveden lämpötilan toimivuutta säädön syötteenä. Seuraavaksi konttorin datan perusteella tehtiin samat kellonaika- ja säävaikutustarkastelut kuin luvussa 3.1 tehtiin muille kohteille. Lopulta tutkittiin järjestelmässä käytössä olevan vaimennetun ulkolämpötilan algoritmin vaikutuksia.

Konttorin lämmityksen säätöjärjestelmässä on käytössä viikonloppupudotus, joten käsitelty data jaetaan sekä teho- että sääanalyseissä kolmeen osaan. Järjestelmässä viikonloppupudotus aloitetaan perjantaina klo 17.00 ja lopetetaan maanantaina klo 00.00. Jotta voidaan varmasti sulkea pois pudotuksen aiheuttamat heilahdukset lämpötilassa, rajataan dataa niin, että arkipäivät sisältävät maanantain klo 16.00 ja perjantain klo 16.00 välisen ajan. Viikonloput taas sisältävät lauantain klo 00.00 ja sunnuntain klo 23.45 välisen ajan. Kolmas ryhmä on näiden väliin jäävät muuttamat tunnit, joissa viikonloppupudotus ja nosto takaisin tapahtuvat. Kiinteistön 47

lämpötilamittauksen tiedot keskiarvoistettiin analysointia varten kerroskohtaisesti.

Kiinteistön patteriverkoston tehoanalyysi aloitettiin laskemalla patteriverkoston teho mittausdatan perusteella käyttäen yhtälöä 3. Virtaama sekä meno- ja paluuviesien lämpötilat on mitattu viiden minuutin välein. Analyysin muut mittauksiedot ovat kuitenkin ilmaistu 15 minuutin välein, joten myös tehopisteet laskettiin keskiarvoistamisen avulla samaan aikasykliin.

$$\phi_{pv} = \rho_v c_{pv} q_{v,pv} (T_{menovesi} - T_{paluuvesi}), \quad (3)$$

jossa

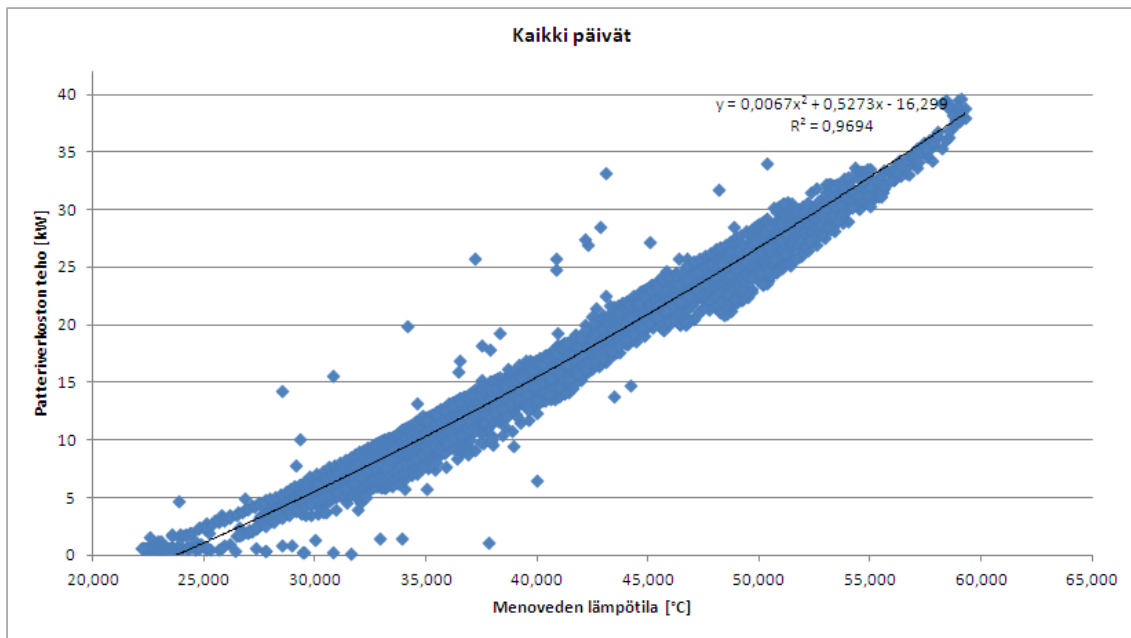
| | |
|-----------------|---|
| ϕ_{pv} | patteriverkoston teho, W |
| ρ_v | veden tiheys, kg/m ³ . Käytetty arvoa 1000 kg/m ³ . |
| c_{pv} | veden ominaislämpökapasiteetti, kJ/kgK. Käytetty arvoa 4,2 kJ/kgK. |
| $q_{v,pv}$ | virtaama, kJ/kgK. Käytetty järjestelmästä mitattua arvoa. |
| $T_{menovesi}$ | menoveden lämpötila, °C. Käytetty järjestelmästä mitattua arvoa. |
| $T_{paluuvesi}$ | paluuvien lämpötila, °C. Käytetty järjestelmästä mitattua arvoa. |

Piirrettiin lasketun tehon ja menoveden lämpötilan riippuvuuskuvaaja ja hyödynnettiin Microsoft Office Excel 2007:n ominaisuutta sovittaa optimaalinen käyrä haluttuun pistejoukkoon. Optimaalisen käyrän löytämiseksi hyödynnettiin selityssastetta (R^2), joka on pistejoukon ja käyrän pisteiden korrelaatiokertoimien neliö. Näin saatiin teoreettinen toisen asteen riippuvuuskuvaaja kiinteistön patteriverkoston tehon ja menoveden lämpötilan välille. Kaikkien päivien data (kaikkien kolmen ryhmän data) ja sovitettu käyrä on esitetty kuvassa 47. Samat tiedot arkipäiville ja viikonlopuille on esitetty kuvissa 48 ja 49.

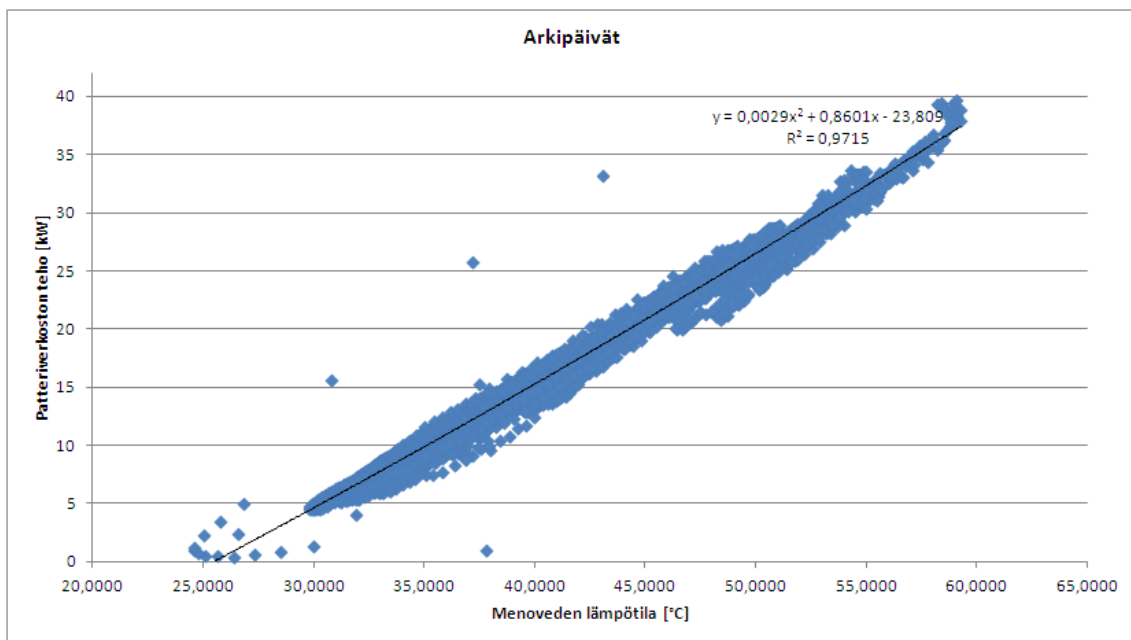
Kuvissa 47 – 49 esitetyt tehon ja menoveden lämpötilojen suhteet ovat huomattavan samanlaiset, mikä oli odotettavaa. Erittely tehtiin kuitenkin viikonloppupudotuksen vaikutuksen huomioinnin takia. Kaikkien päivien datan perusteella tehon (y) ja menoveden lämpötilan (x) välille saatiin suhde $y = 0,0067x^2 + 0,5273x - 16,299$. Arkena suhde on $y = 0,0029x^2 + 0,8601x - 23,809$ ja viikonloppuisin $y = 0,0132xx^2 + 0,0726x - 8,1738$. Kaikissa käyrissä selitysaste on noin 97 %, joten käyrät kuvaavat datajoukkoa erittäin hyvin.

Laskettua tehodataa verrattiin sovitetun käyrän arvoihin ja prosentuaalista poikkeamaa vertailtiin sekä kellonaikaan, auringon säteilyyn että sisälämpötiloihin. Tehon poikkeaman ja kellonajan suhde on esitetty kuvissa 50 – 52. Auringon säteilyn suhde taas näkyy kuvissa 53 – 55. Sisälämpötilat on jaettu kerroksittain ja niiden riippuvuudet näkyvät kuvissa 56 – 64. Kun kuvaajissa y -akselilla esitetty poikkeama tehojen välillä on negatiivinen, rakennuksen tehonkulutus on pienempi kuin teoreettisen riippuvuuskuvaajan arvo. Tällöin siis patteriverkoston menoveden lämpötila on korkea, mutta tehonkulutus on pieni. Tehojen välisen poikkeaman ollessa positiivinen rakennus kuluttaa tehoa enemmän kuin teoreettinen riippuvuuskuvaaja kertoo.

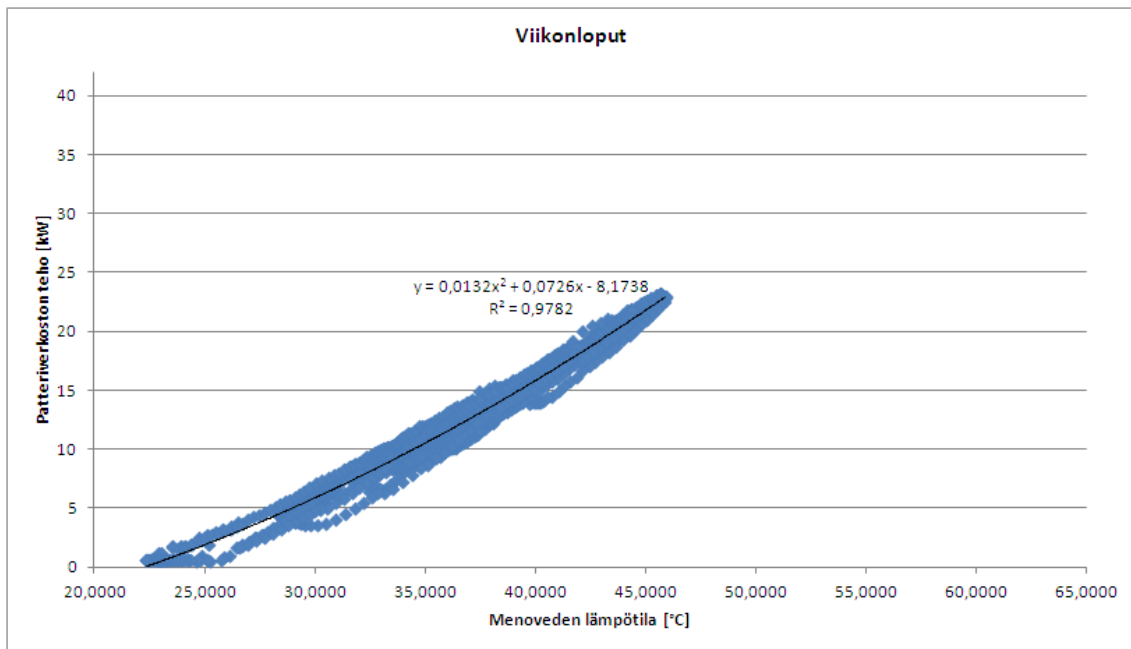
Kuvissa 50 – 52 esitetään tehopoikkeaman suhteet kellonaikoihin. Kaikissa kuvissa on huomattavissa selkeä trendi. Öisin tehoarvojen poikkeama on selkeästi positiivisella puolella ja puolenpäivän ja iltakahdeksan välillä taas negatiivisella puolella. Siis öisin rakennuksen teho on suurempi kuin teoreettinen riippuvuuskuvaaja kertoo.



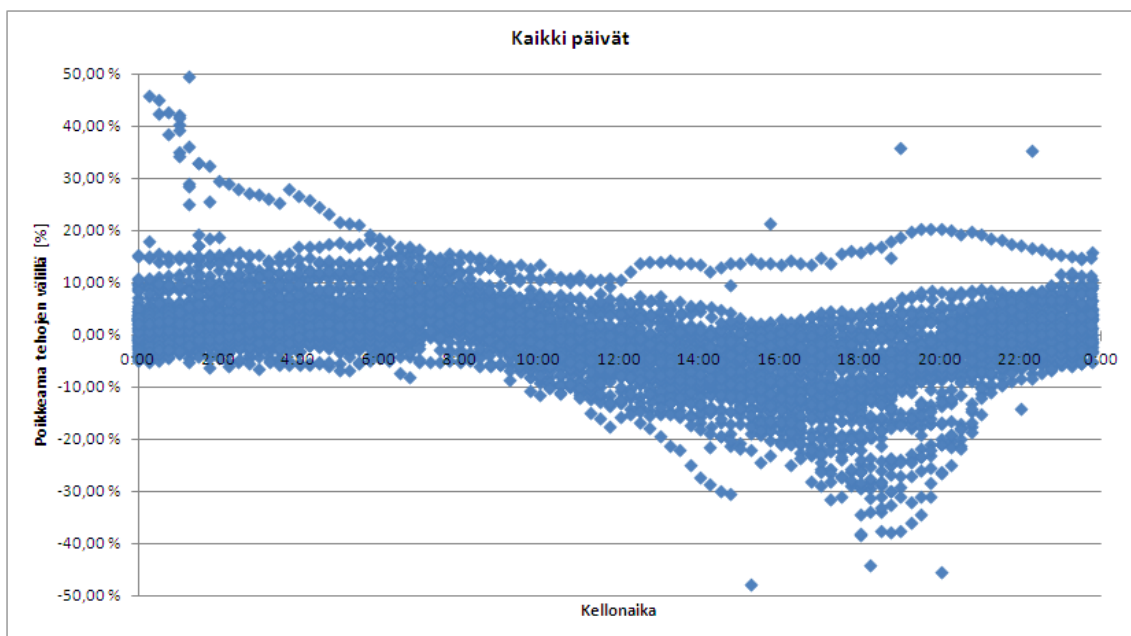
Kuva 47: Patteriverkoston mittausdatasta lasketun tehon suhde menoveden lämpötilaan ja dataan sovitettu käyrä



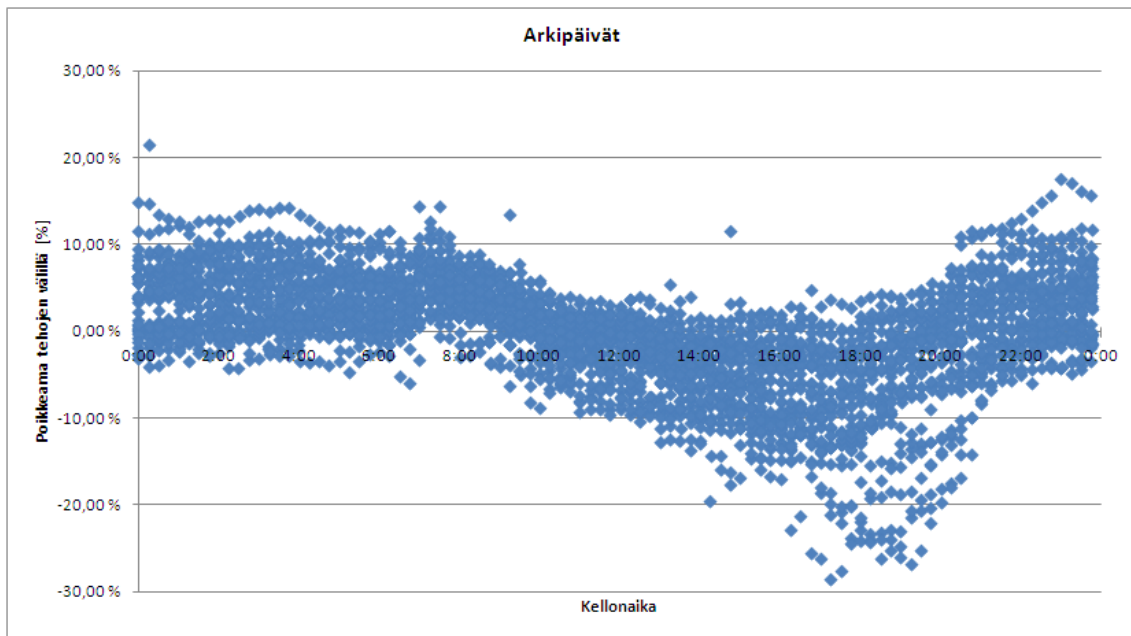
Kuva 48: Patteriverkoston arkipäivien mittausdatasta lasketun tehon suhde menoveden lämpötilaan ja dataan sovitettu käyrä



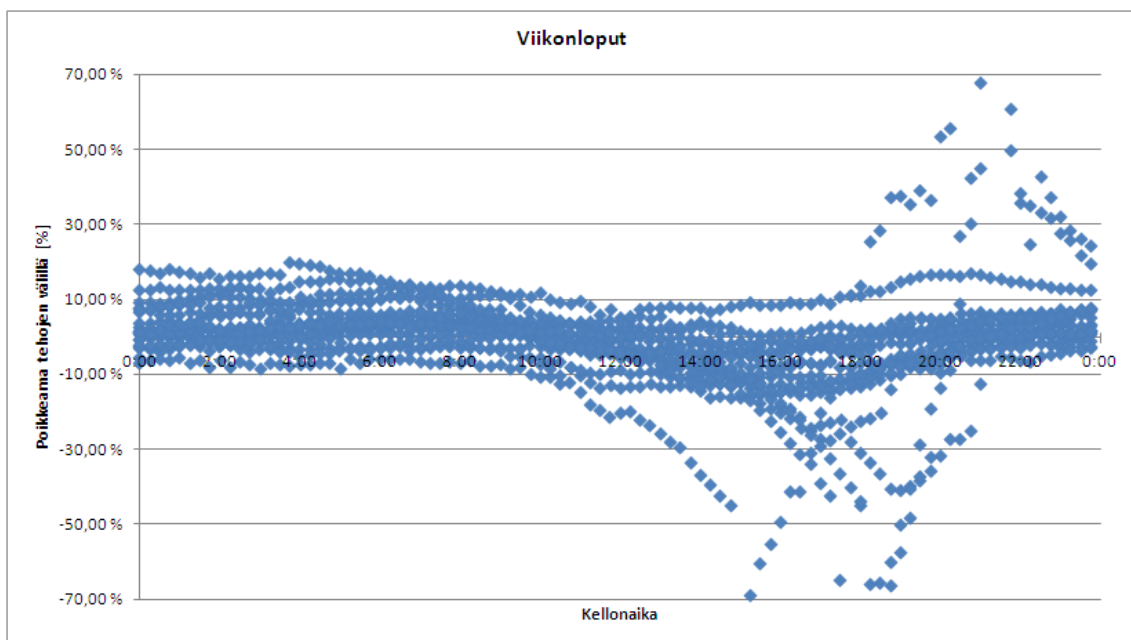
Kuva 49: Patteriverkoston viikonloppujen mittausdatasta lasketun tehon suhde menoveden lämpötilaan ja dataan sovitettu käyrä



Kuva 50: Tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna kellonaikaan

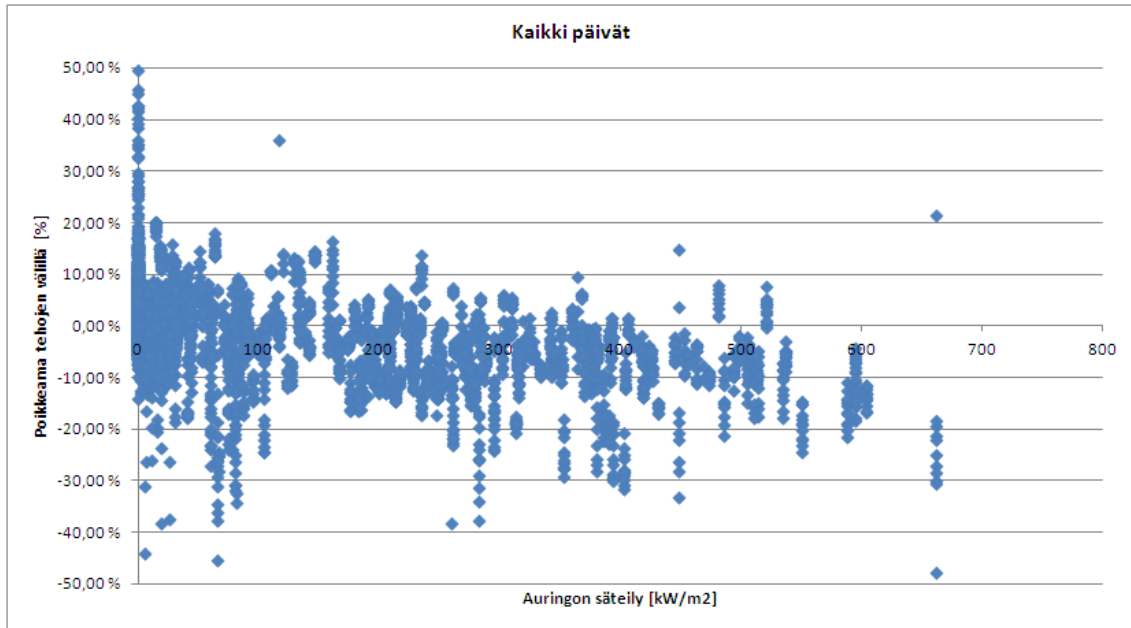


Kuva 51: Arkipäivien tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna kellonaikaan



Kuva 52: Viikonloppujen tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna kellonaikaan

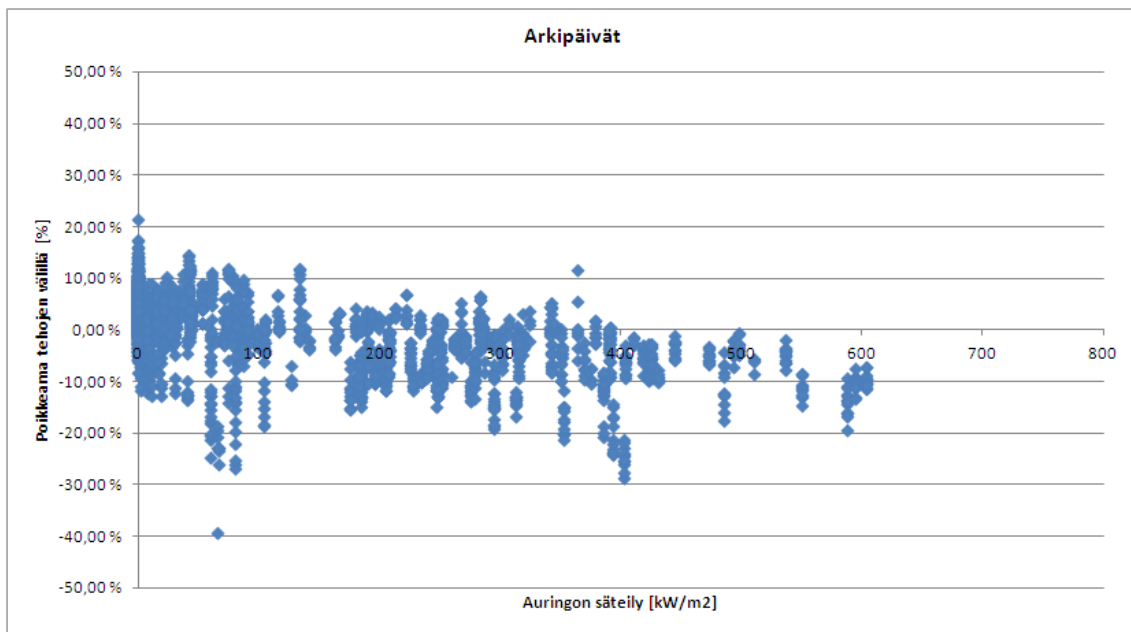
ja päivisin taas pienempi. Erityisesti tämä trendi on nähtävissä arkipäivinä kuvassa 51, jolloin sekä positiiviset arvot öisin että negatiiviset päivisin korostuvat. Kuvassa 52 nähtävien viikonloppuarvojen perusteella voidaan todeta, ettei viikonloppuisin trendi ole yhtä vahva. Samansuuntaista käytöstä on kuitenkin silloinkin huomattavissa.



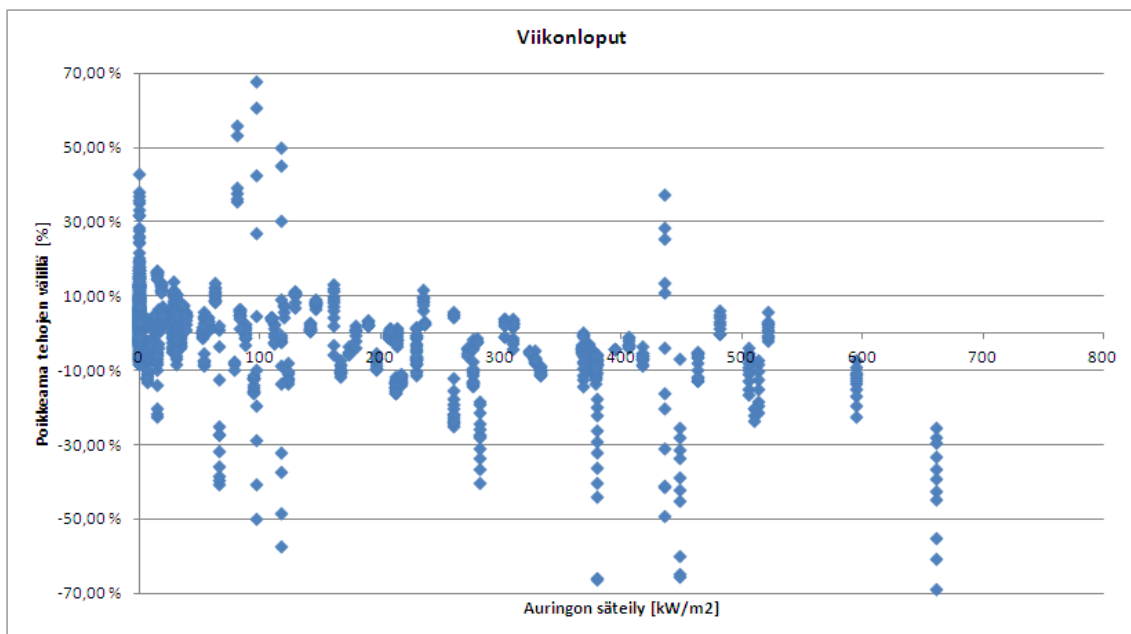
Kuva 53: Tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna auringon säteilyyn

Poikkeamaa tehojen välillä verrataan auringon säteilyyn kuvissa 53 – 55. Kuten riippuvuudessa kelloaikaan, näkyy tehojen välisen poikkeaman suhde auringon säteilyyn myös selvästi. Auringon säteilyn ollessa vähäistä, on tehojen välinen poikkeama positiivinen ja auringon säteilyn määrän kasvaessa poikkeama laskee vähitellen yhä negatiivisemmaksi. Erityisen hyvin trendi näkyy kaikkien päivien sekä arjen datassa, mutta myös viikonloppu toteuttaa maltillisemmin samaa muotoa.

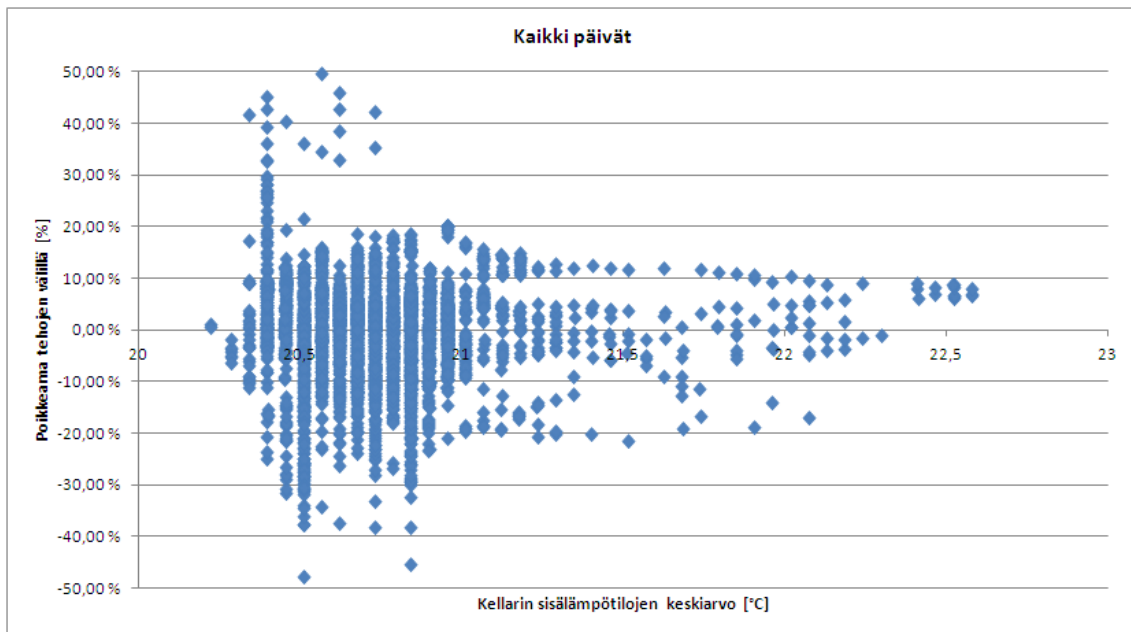
Kuvat 56 – 58 esittävät tehojen välisen poikkeaman ja sisälämpötilojen suhdetta kaikkina päivinä. Kuva 56 näyttää suhteen kellarikerroksessa ja todetaan, että kuvaaja on huomattavan symmetrinen x-akselin suhteen. Ensimmäisen kerroksen kuvaaja on piirretty kuvaan 57. Datajoukosta on huomattavissa, että pääasiassa sisälämpötilojen pienentyessä tehojen poikkeama painottuu yhä positiivisempiin arvoihin. Sisälämpötilan kasvaessa on poikkeama taas negatiivinen. Kuvan 58 kuvaaja esittää toisen kerroksen mittauksia ja kuvaajan muoto noudattaa samaa muotoa kuin ensimmäisen kerroksen kuvaaja. Tosin se on korostetumpi ja selkeä laskusuuntaisuus on huomattavissa datapisteiden asetelmassa. Huomattavaa kaikkien päivien kuvaajien vertailussa sekä arkipäivien että viikonloppujen dataan on, että kaikki kuvaajat on piirretty omien riippuvuuskäyriensä mukaan. Näin ollen kaikkien päivien data ei ole siis arkipäivien ja viikonloppujen datojen summa sellaisenaan.



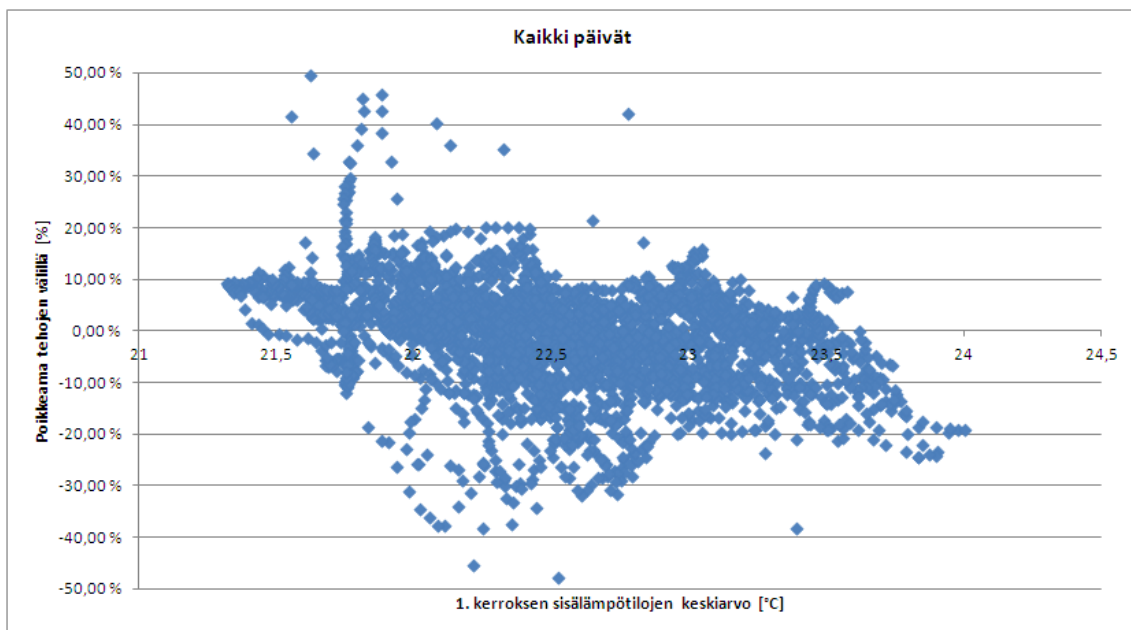
Kuva 54: Arkipäivien tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna auringon säteilyyn



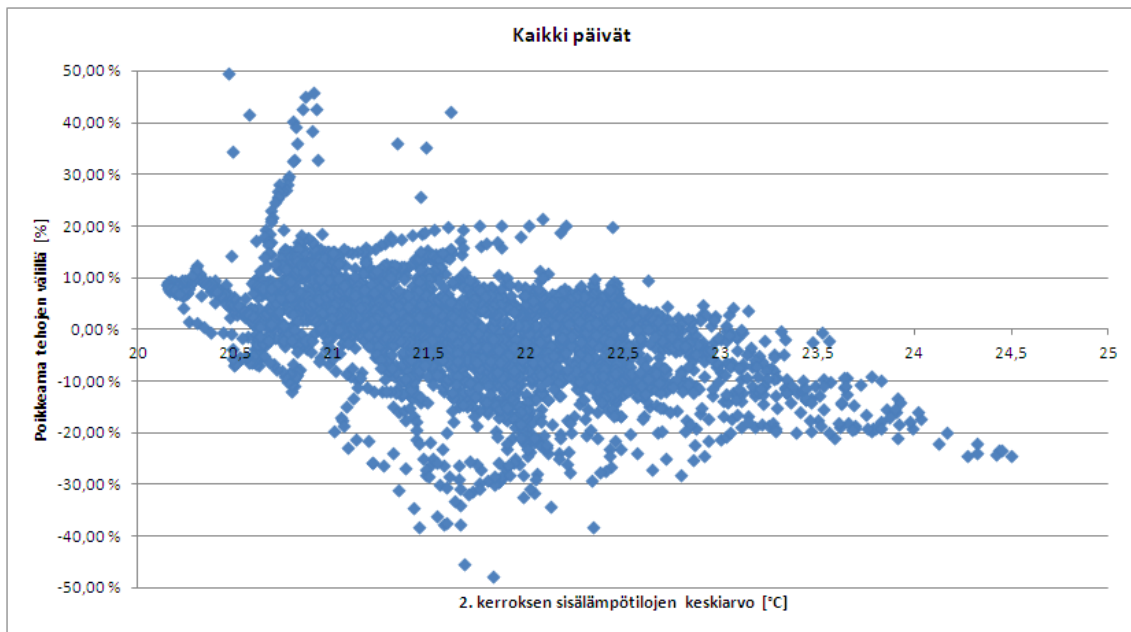
Kuva 55: Viikonloppujen tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna auringon säteilyyn



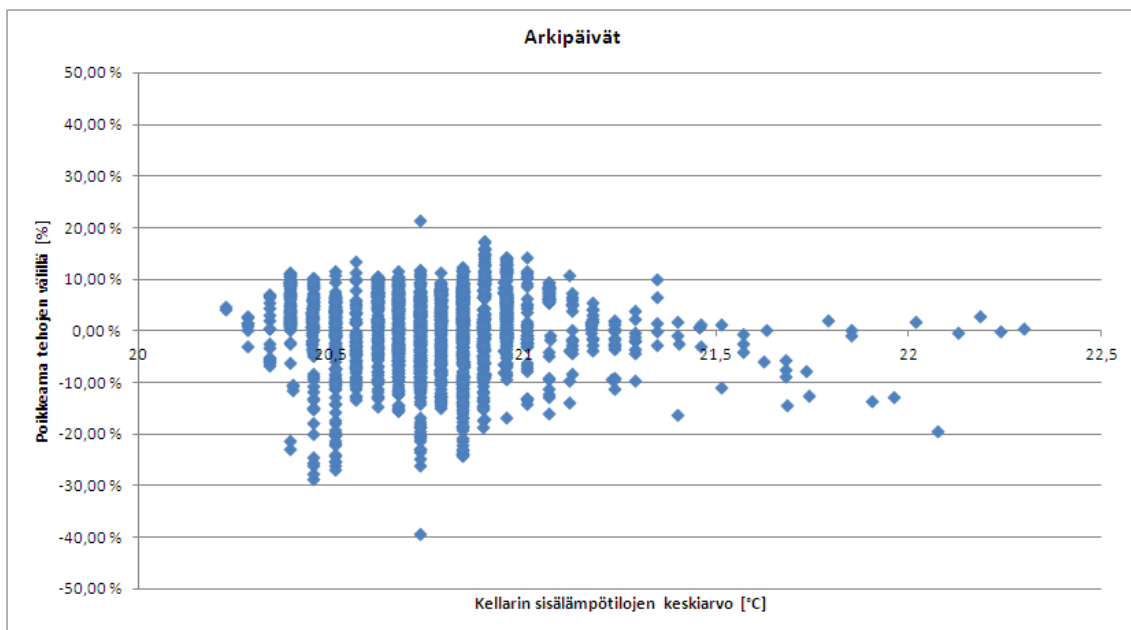
Kuva 56: Tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna sisälämpötilojen keskiarvoon kellarissa



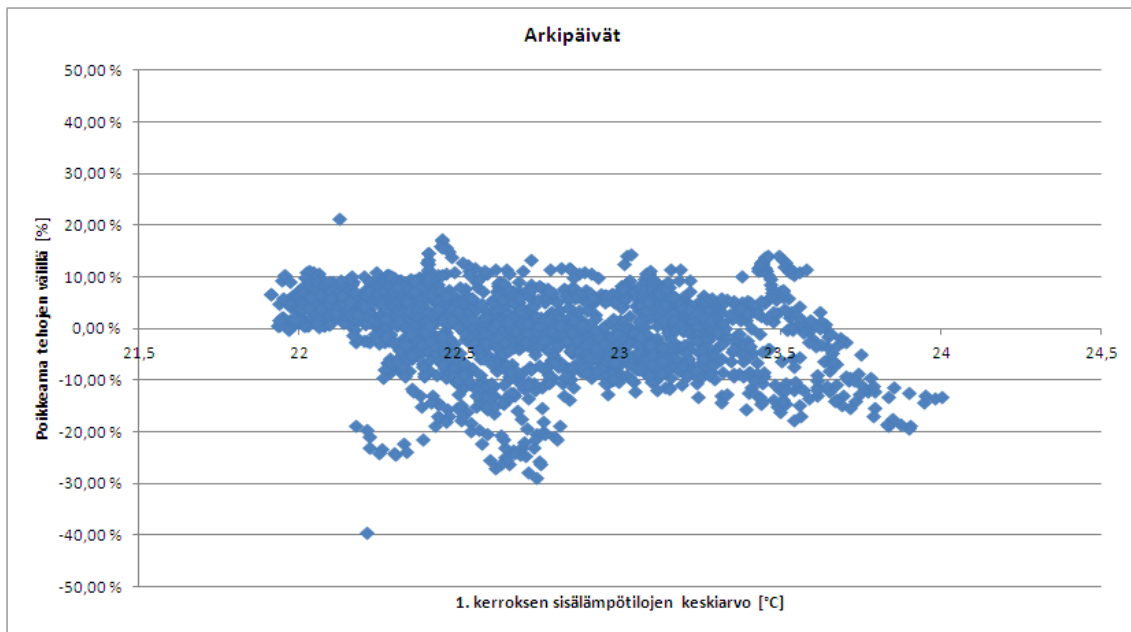
Kuva 57: Tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna sisälämpötilojen keskiarvoon 1. kerroksessa



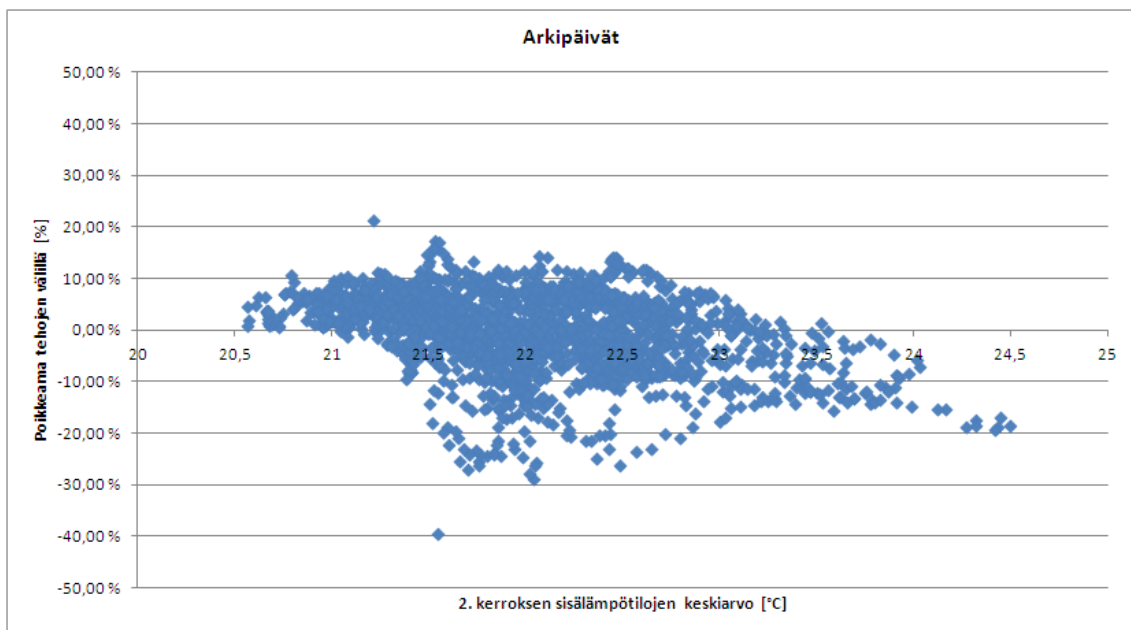
Kuva 58: Tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna sisälämpötilojen keskiarvoon 2. kerroksessa



Kuva 59: Arkipäivien tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna sisälämpötilojen keskiarvoon kellarissa

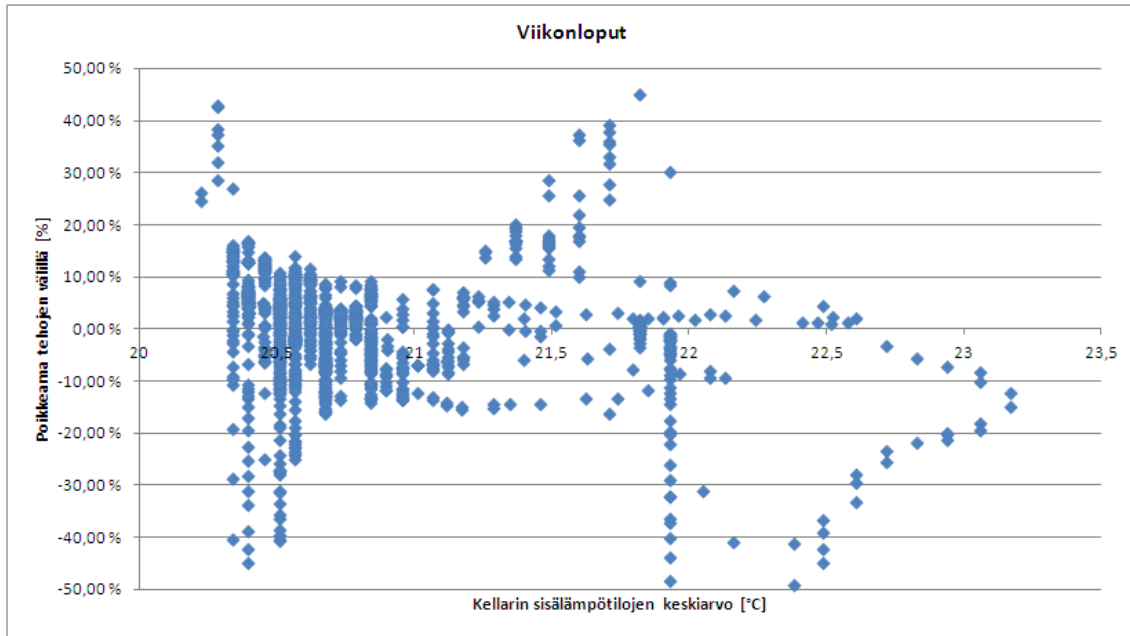


Kuva 60: Arkipäivien tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna sisälämpötilojen keskiarvoon 1. kerroksessa



Kuva 61: Arkipäivien tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna sisälämpötilojen keskiarvoon 2. kerroksessa

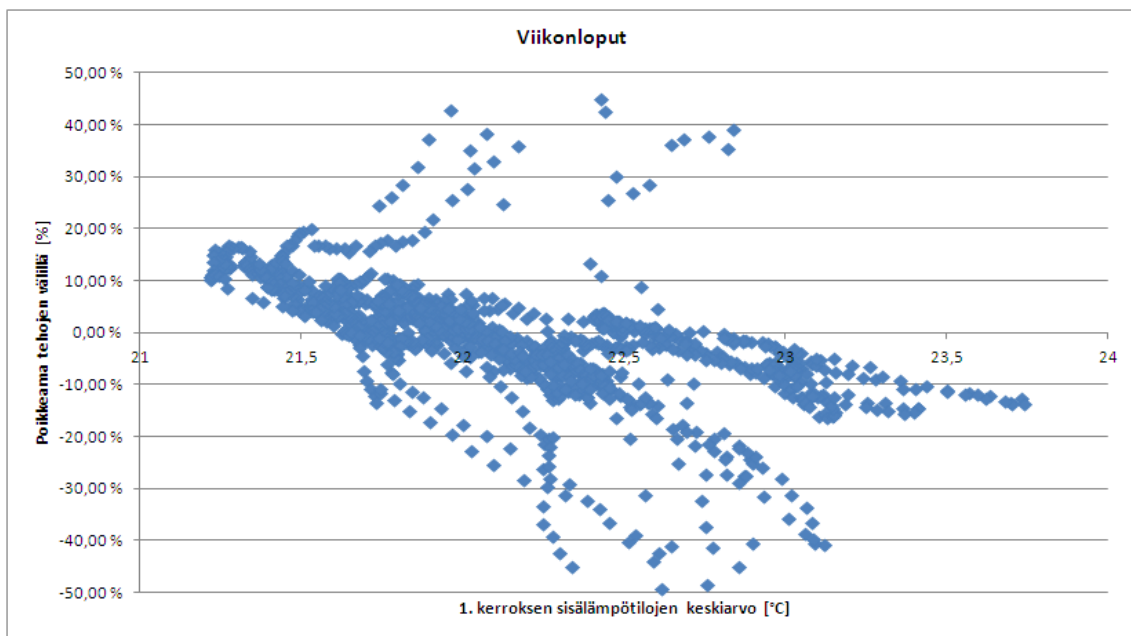
Poikkeaman tehojen välillä ja sisälämpötilojen vertailu arkipäivinä esitetään kuvissa 59 – 61. Kuten kaikkien päivien datassakin, kellarikerroksen sisälämpötilojen suhde tehojen poikkeamaan on lähes peilisymmetrinen x-akselin suhteen. Ensimmäisen kerroksen mittauksissa kuvassa 60 on myös huomattavissa sama muoto kuin kaikkien päivien mittausten kuvaajassa. Pääasiassa siis matalilla sisälämpötiloilla tehojen välinen poikkeama on positiivinen ja korkeilla sisälämpötiloilla taas negatiivinen. Toisen kerroksen kuvaaja on huomattavan samanlainen kuin ensimmäisen kerroksen kuvaaja, mutta lämpötilan vaihteluväli on suurempi.



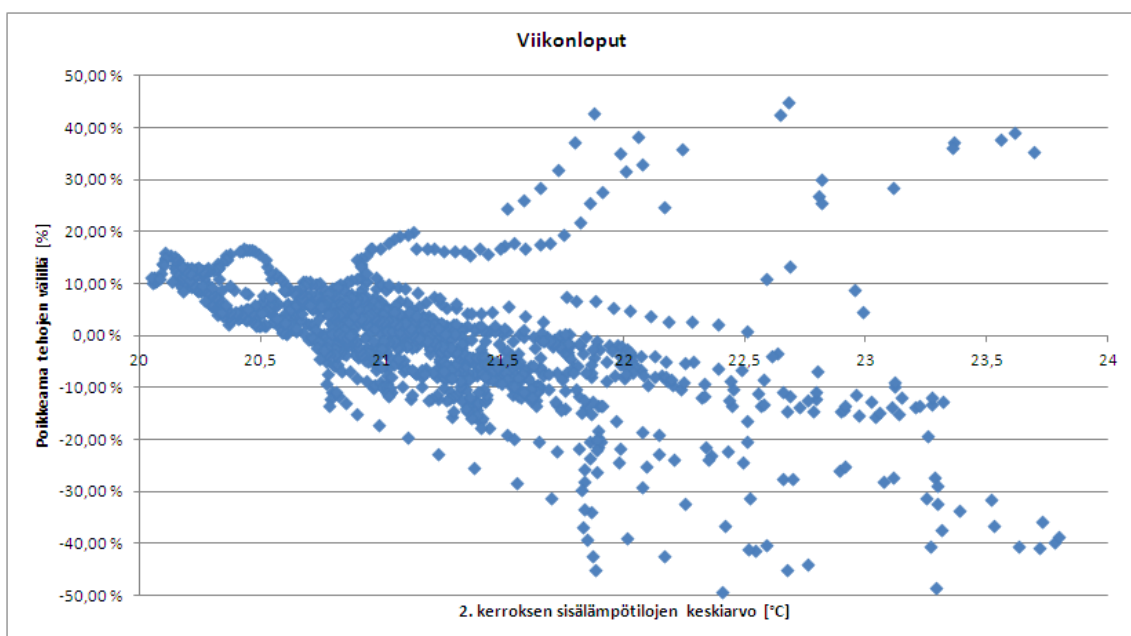
Kuva 62: Viikonloppujen tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna sisälämpötilojen keskiarvoon kellarissa

Kuvissa 62 – 64 on esitetty tehojen välisen poikkeaman ja sisälämpötilojen suhteiden kuvaajat viikonloppuisin. Kellarin mittaustiedoista on haastava löytää vielä-kään mitään johdonmukaisuutta. Ensimmäisen ja toisen kerroksen kuvista voidaan kuitenkin nähdä samaa muotoa kuin arkipäivinäkin. Trendinä on positiivinen poikkeama, kun sisälämpötila on matalalla, ja negatiivinen poikkeama, kun sisälämpötila on korkealla. Toisin kuin arkipäivinä, viikonloppuisin data kuitenkin hajaantuu huomattavan vahvasti ja yksittäisiä pisteitä löytyy koko kuvaajan laajuudelta.

Automaatiojärjestelmässä on käytössä luvussa 3.2.1 esitelty vaimennettu ulkolämpötila. Ulkolämpötila-arvon vaimentamisella on pyritty ottamaan huomioon kiinteistön rakenteiden vaikutus ja tasaamaan näin sisälämpötilaa. Vaimennetun ulkolämpötilan käytön ero todellisen ulkolämpötilan arvon käyttöön näkyy kuvassa 65. Menoveden mitattu lämpötila on dataa, jossa on käytössä ulkolämpötilan vaimennus. Menoveden teoreettinen lämpötila taas on laskettu asetusravokäyrän perusteella. Menoveden lämpötilojen erotus on siis näiden kahden eri tavalla määritellyn menoveden lämpötilan arvojen erotus. Kun mitattu menoveden lämpötila on suurempi

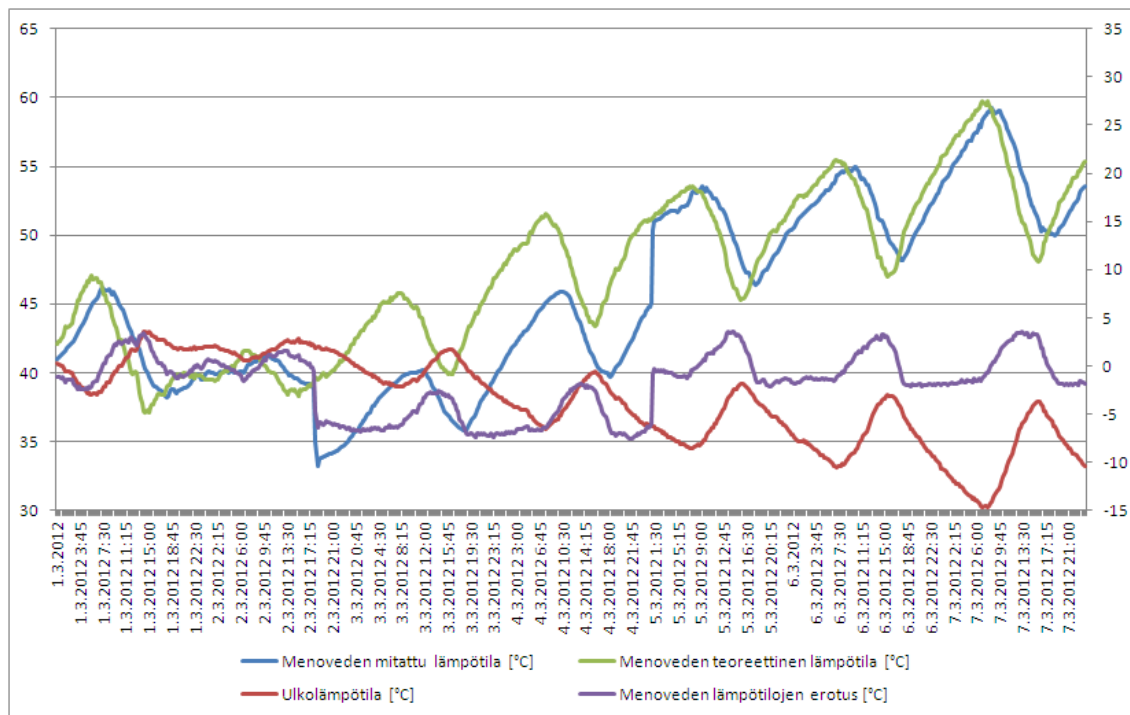


Kuva 63: Viikonloppujen tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna sisälämpötilojen keskiarvoon 1. kerroksessa



Kuva 64: Viikonloppujen tehodatan prosentuaalinen poikkeama sovitetusta käyrästä verrattuna sisälämpötilojen keskiarvoon 2. kerroksessa

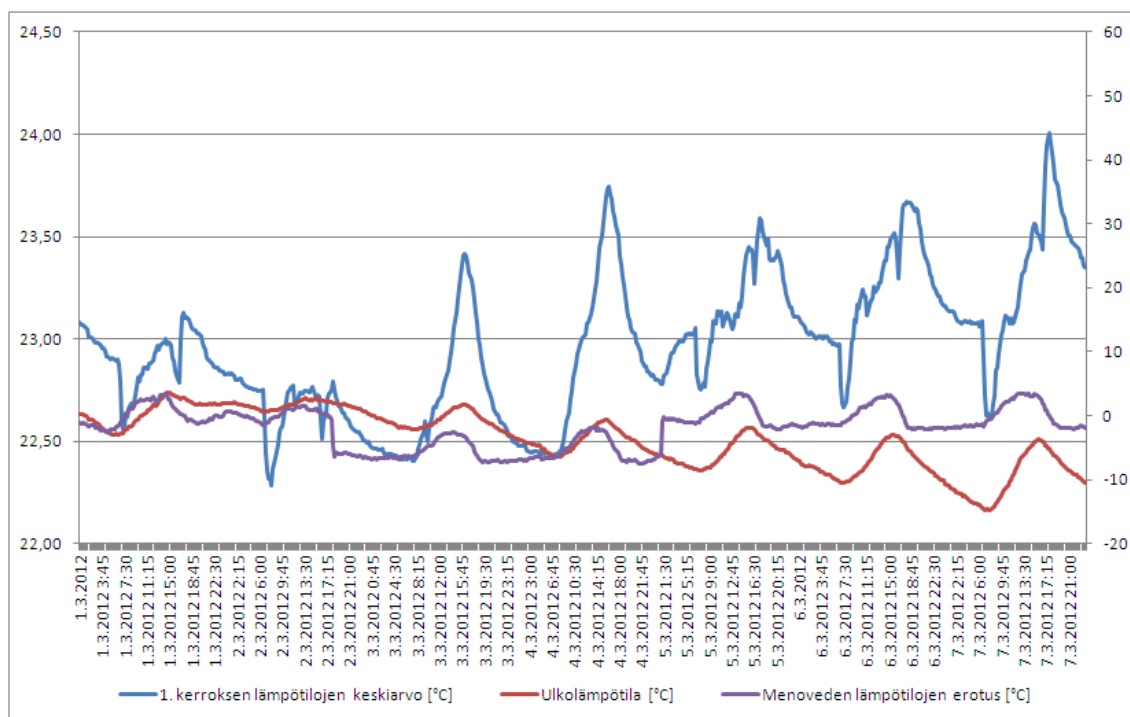
kuin teoreettinen arvo, on erotus positiivinen. Kuvasta nähdään erotus-käyrän perusteella helposti, että menoveden lämpötila on päivisin huomattavasti korkeampi vaimennetun ulkolämpötilan ollessa käytössä kuin sen ollessa pois käytöstä. Lisäksi erotus-käyrältä ilmenee hyvin viikonloppupudotuksen vaikutus kohdassa 2.3.2012 17.15 – 5.3.2012 1.30.



Kuva 65: Menoveden lämpötilojen suhde toisiinsa, kun ensimmäinen menoveden lämpötila on mitattu ja toinen on laskettu käyrän perusteella. Vasen y-akseli on käytössä menoveden lämpötiloilla ja oikea y-akseli ulkolämpötilalla ja menovesien lämpötilojen erotuksella

Kuvassa 66 on piirretty ensimmäisen kerroksen sisälämpötilojen keskiarvokäyrä samaan kuvaan menoveden lämpötilojen erotusten kanssa. Kuvasta huomataan, että kiinteistön sisälämpötilat nousevat huomattavasti päivisin ja myös menoveden lämpötilojen erotus on tällöin positiivinen.

Patteriverkoston tehon laskenta esitellään yhtälössä 3. Tämän avulla pystyttiin selvittämään kiinteistön patteriverkoston teho mittausten perusteella. Vaimennetun ulkolämpötilan algoritmin toimivuutta tarkasteltiin vertailemalla reaalista patteriverkoston tehoa asetusarvokäyrästä mukaan laskettuun tehoon. Kuvassa 47 ilmenettiin patteriverkoston tehon ja menovedenlämpötilan riippuvuutta kiinteistössä. Kuvan perusteella piirretty riippuvuusfunktio on verkoston ja kiinteistön ominaisuuksien muodostama, joten sitä hyödynnettiin myös laskettaessa tehoa asetusarvokäyrästä mukaan. Teholasku esitetään yhtälössä 4 ja siihen liittyvä asetusarvokäyrästä mukainen menovedenlämpötilan laskeminen yhtälössä 5. Tehovertailussa käsitellään dataa yhtenä joukkona eikä viikonloppuja lähdetty erottelamaan muista



Kuva 66: 1. kerroksen sisälämpötilojen keskiarvon suhde menoveden lämpötilojen erotukseen. Vasen y-akseli on käytössä sisälämpötilakäyrällä ja oikea y-akseli ulkolämpötilalla ja menovesien lämpötilojen erotuksella

mittaustiedoista. Tämä johtuu siitä, että kolmella eri tavalla piirretyt riippuvuusfunktioit ovat niin samanlaisia, ettei erittelystä saatu lisäinformaatiota. Laskettuun tehoon otettiin lopuksi huomioon viikonloppupudotus, jotta vaimennetun lämpötilan logiikan vaikutukset tulisivat mahdollisimman selvästi esille.

$$\phi_{as} = 0,0067T_{mv}^2 + 0,5273T_{mv} - 16,299 \quad (4)$$

$$T_{mv} = \begin{cases} 65^\circ C & T_u < -27^\circ C \\ 60^\circ C + \frac{65^\circ C - 60^\circ C}{(-15^\circ C - (-27^\circ C)) * (-15^\circ C - T_u)} & -27^\circ C \leq T_u < -15^\circ C \\ 50^\circ C + \frac{60^\circ C - 50^\circ C}{(-5^\circ C - (-15^\circ C)) * (-5^\circ C - T_u)} & -15^\circ C \leq T_u < -5^\circ C \\ 35^\circ C + \frac{50^\circ C - 35^\circ C}{(5^\circ C - (-5^\circ C)) * (5^\circ C - T_u)} & -5^\circ C \leq T_u < 5^\circ C \\ 20^\circ C + \frac{35^\circ C - 20^\circ C}{(20^\circ C - 5^\circ C) * (20^\circ C - T_u)} & 5^\circ C \leq T_u < 20^\circ C \\ 20^\circ C & T_u \geq 20^\circ C \end{cases} \quad (5)$$

joissa

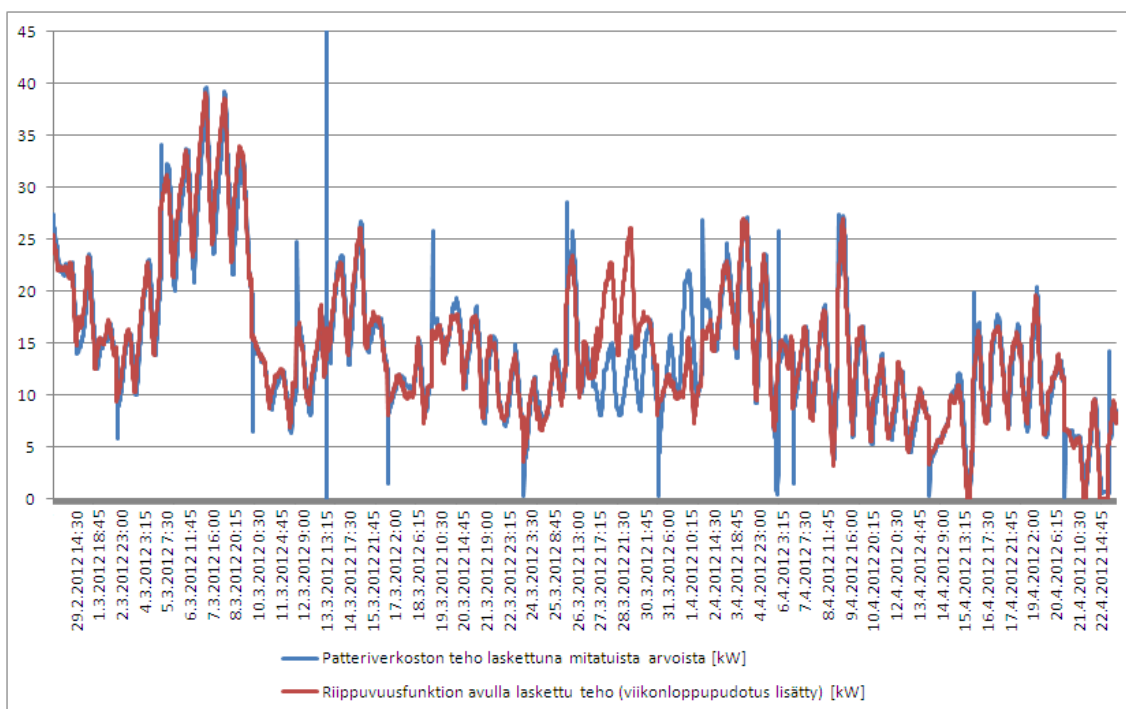
ϕ_{as} asetusarvokäyrästä laskettu patteriverkoston teho, W
 T_{mv} patteriverkoston menoveden lämpötila, °C
 T_u ulkolämpötila, °C

Kuvassa 67 on esitetty mitattujen arvojen perusteella lasketun vaimennetun ulkolämpötilan menetelmän tehon ja asetusarvokäyrästä lasketun teoreettisen tehon käyrät. Huomattavaa on, kuinka saman kaltaista tehonkulutus on molemmissa tapauksissa. Mitatun datan perusteella lasketun tehon käyrässä on luonnollisesti mittavirheistä johtuvien virhepisteiden aiheuttamaa heittelyä. Lisäksi maaliskuun vaihteessa on noin viikon jakso, jolloin käyrät eriyvät huomattavasti. Eriäminen johtuu virheestä, jota tarkastellaan tarkemmin luvussa 3.2.3.

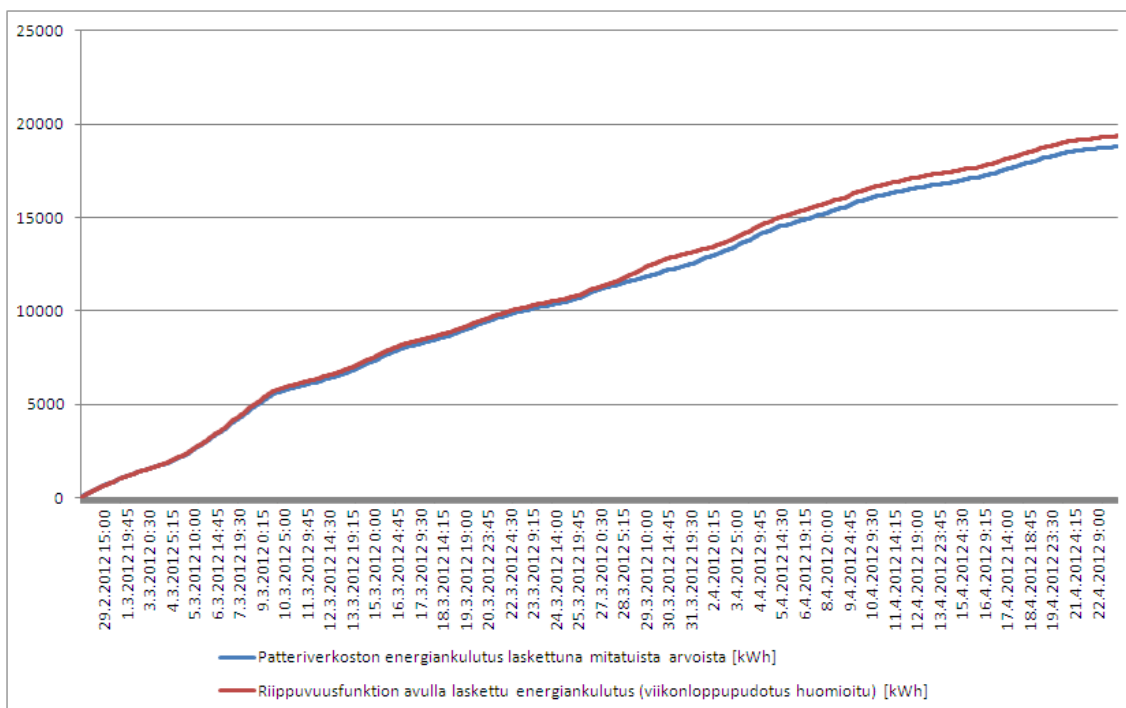
15 minuutin ajanjaksoa koskevat hetkelliset tehoarvot kerrottiin ajanjakson pituudella ja kumulatiivinen kuvaaja on esitetty kuvassa 68. Lyhyellä aikajänteellä ei energiankulutuksessakaan ole huomattavissa eroja. Kuitenkin maaliskuun lopussa, kuukauden seurannan jälkeen, voi huomata riippuvuusfunktiolla lasketun teoreettisen menetelmän kuluttavan hieman enemmän energiaa. Seurantajakson loppuun asti maaliskuun lopulla tehty ero pysyy suhteellisen vakiona.

Vantaan konttorin mittausten perusteella tehtiin vastaavat sisälämpötila-analyysit kuin luvussa 3.1 muissakin kohteissa. Datan perusteella etsittiin sisälämpötilan yhteyttä sekä kellonaikaan että auringon säteilyyn. Kuvissa 69 – 76 esitetään ensimmäisen ja toisen kerroksen datat sekä kaikkina päivinä, arkena että viikonloppuna. Kellarikerroksen kuvaajia ei esitetä, koska ne eivät tuo lisäinformaatiota asiaan. Samasta syystä kuvaajat kaikkien päivien datasta jätettiin pois.

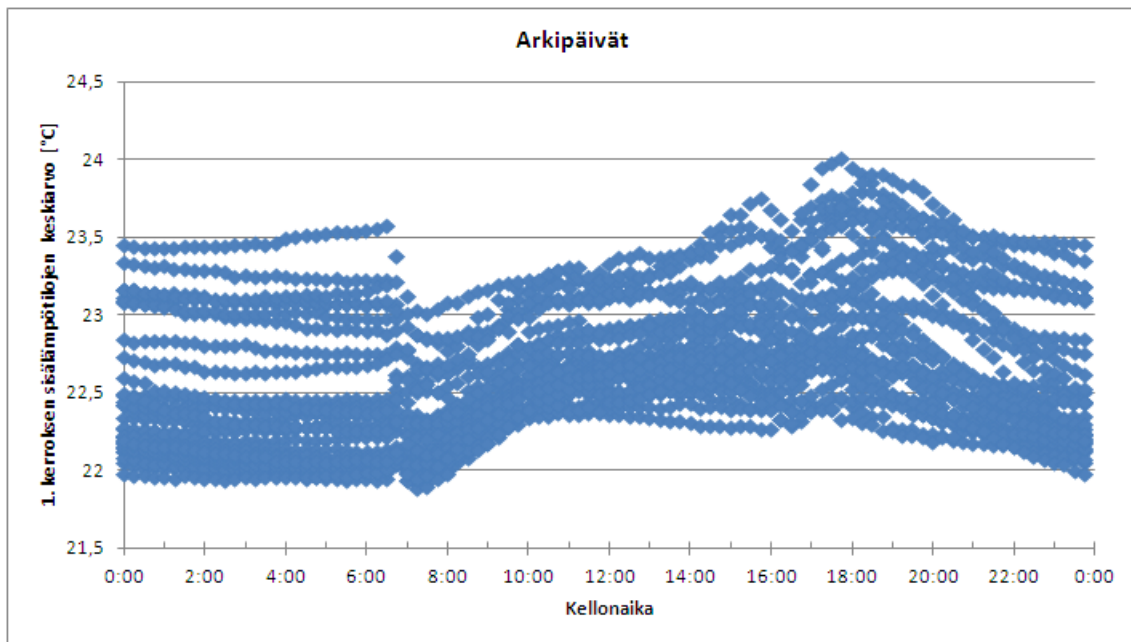
Kuvissa 69 ja 70 esitetään arkipäivien sisälämpötilojen riippuvuus kellonaikaan ensimmäisessä ja toisessa kerroksessa. Molempien kerrosten datassa on huomattavissa erittäin samanlainen trendi. Toisessa kerroksessa lämpötilavaihtelut ovat suuremmat, mutta molempien sisälämpötilat kasvavat tasaisesti virka-aikana ja maksimilämpötilat saavutetaan iltakuuden ja -kahdeksan välillä. Molemmissa kerroksissa on myös aamukuuden ja -kahdeksan välillä matalimmat lämpötilat. Viikonloppujen sisälämpötilojen ja kelloaikojen riippuvuudet näkyvät kuvissa 71 ja 72. Myös



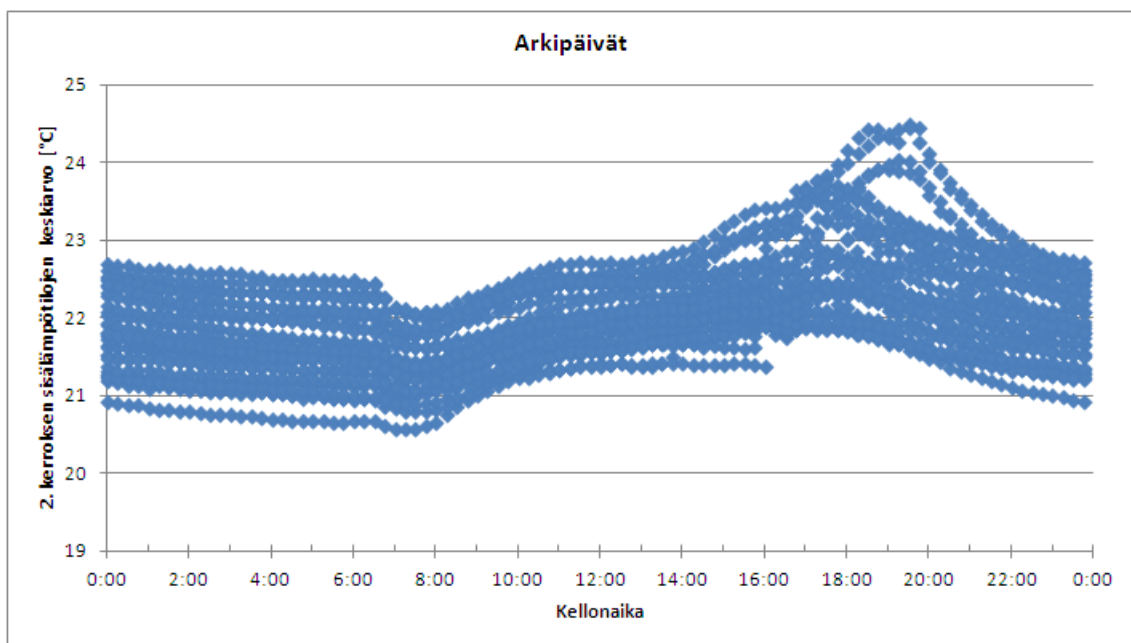
Kuva 67: Vaimennetun ulkolämpötilan menetelmän ja asetusarvokäyrästä perusteella lasketun tehon vertailu



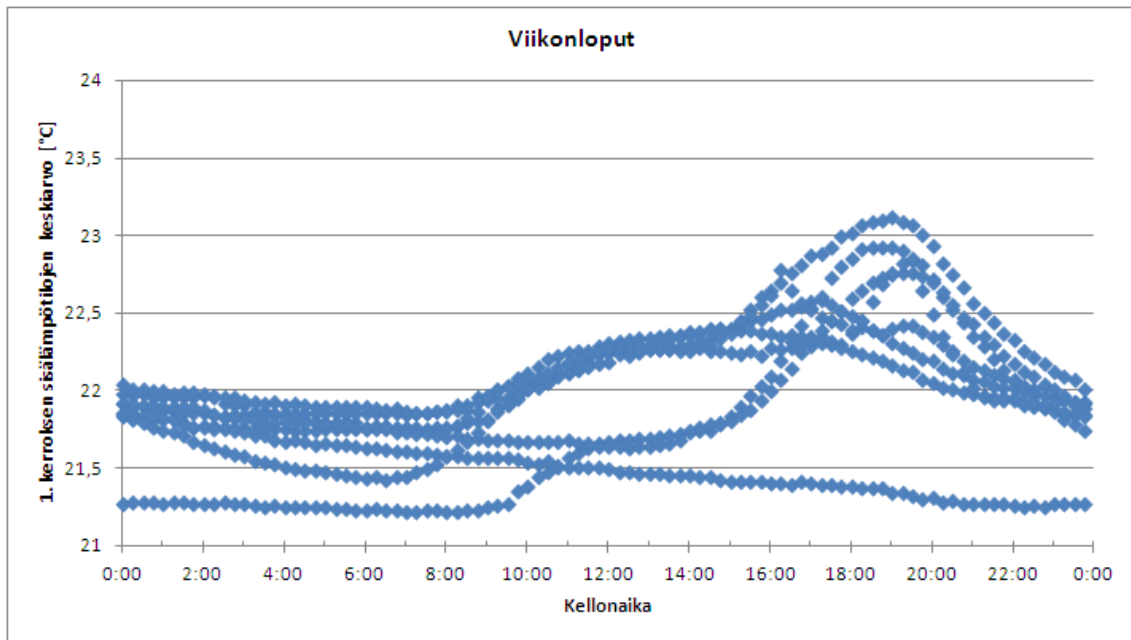
Kuva 68: Vaimennetun ulkolämpötilan menetelmän ja asetusarvokäyrästä perusteella lasketun kumulatiivisten energiankulutuksien vertailu



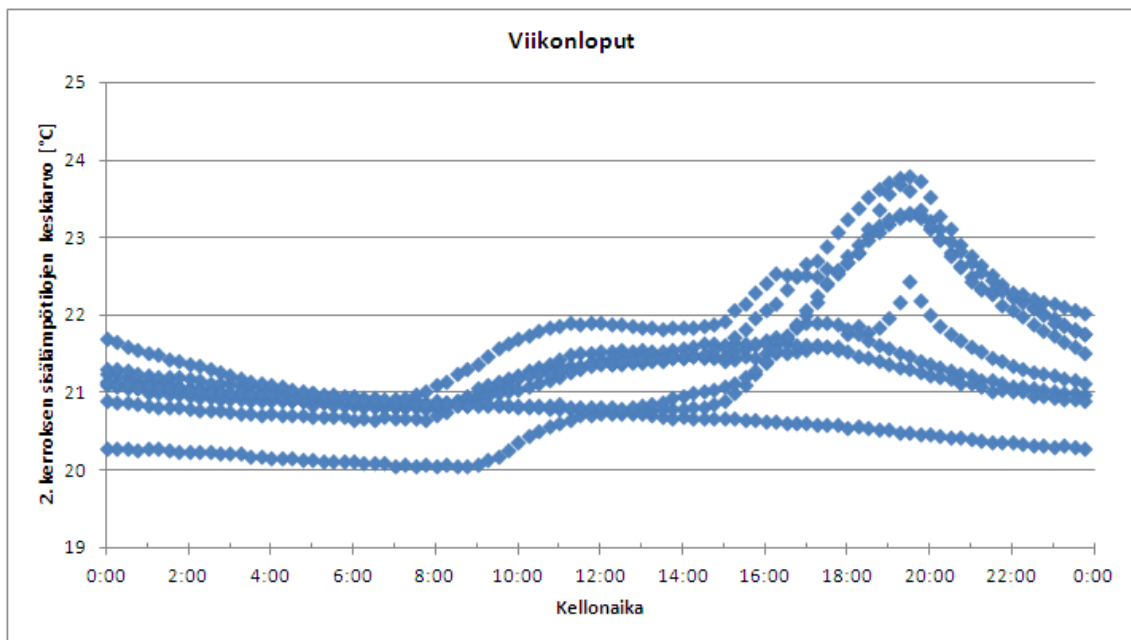
Kuva 69: Sisälämpötilan ja kellonajan riippuvuus 1. kerroksessa arkipäivinä



Kuva 70: Sisälämpötilan ja kellonajan riippuvuus 2. kerroksessa arkipäivinä

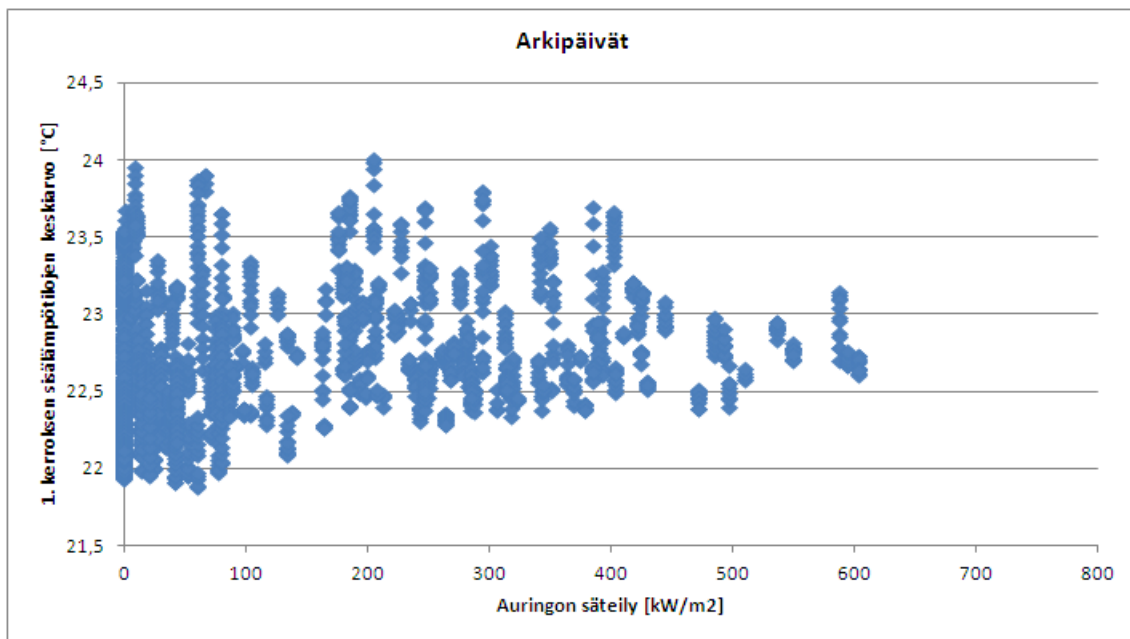


Kuva 71: Sisälämpötilan ja kellonajan riippuvuus 1. kerroksessa viikonloppuina

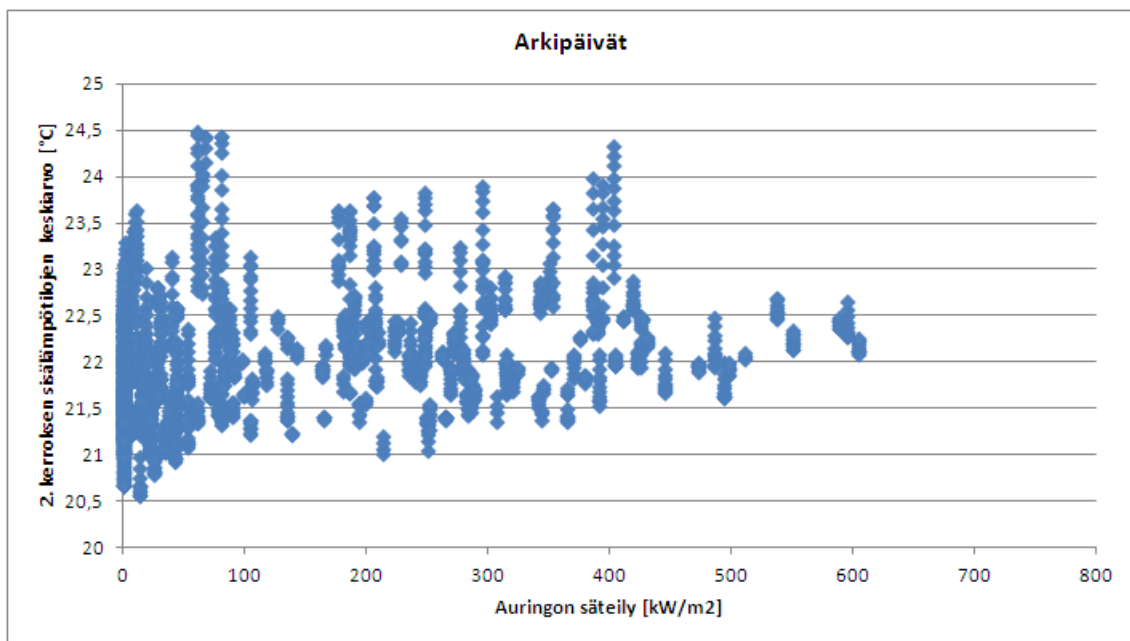


Kuva 72: Sisälämpötilan ja kellonajan riippuvuus 2. kerroksessa viikonloppuina

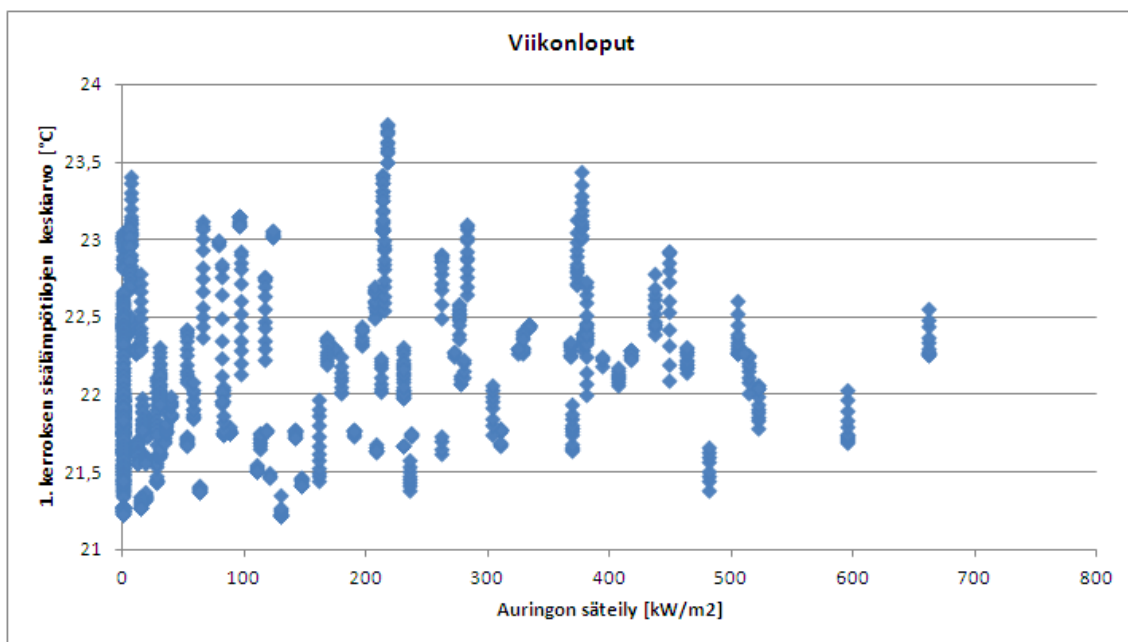
viikonloppujen datassa on samanlainen trendi kuin arkipäivien. Lämpötila kohoaa tasaisesti molemmissa kerroksissa aamukahdeksasta iltakahdeksaan, jonka jälkeen putoaa nopeasti matalaan yölämpötilaan.



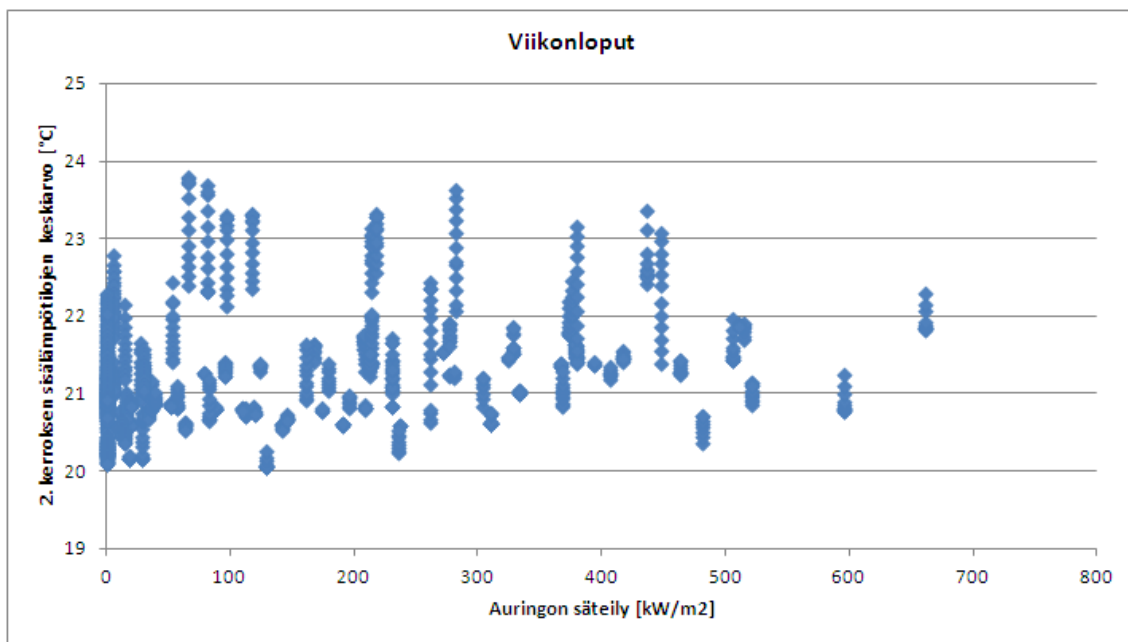
Kuva 73: Sisälämpötilan ja auringon säteilyn riippuvuus 1. kerroksessa arkipäivinä



Kuva 74: Sisälämpötilan ja auringon säteilyn riippuvuus 2. kerroksessa arkipäivinä



Kuva 75: Sisälämpötilan ja auringon säteilyn riippuvuus 1. kerroksessa viikonloppuina



Kuva 76: Sisälämpötilan ja auringon säteilyn riippuvuus 2. kerroksessa viikonloppuina

Sisälämpötilan ja auringon säteilyn riippuvuus arkipäivinä nähdään kuvissa 73 ja 74. Molempien kerrosten data käyttäytyy samantapaisesti. Vaikka korkeita lämpötiloja löytyy kaikilla auringon säteilyn määrillä, voidaan huomata, että matalia lämpötiloja ei esiinny. Mitä korkeammaksi auringon säteilyn määrä kasvaa, sitä korkeammaksi minimilämpötila nousee. Kuvissa 75 ja 76 on esitetty sisälämpötilan suhde auringon säteilyyn viikonloppuisin. Viikonloppujen data on huomattavan tasainen verrattuna arkipäivien dataan. Auringon säteilyn kasvaessa voidaan tulkita jonkinlaista painopisteen siirtymistä lämpimämpiin sisälämpötiloihin.

Kuten muiden kohteiden tarkastelussa luvussa 3.1 sisälämpötila-analyysin luonteeseen kuului trendien hahmottaminen, joten yksittäisten pisteiden virherajat eivät olleet olennaista informaatiota. Yksittäisten mittavirheiden arvot pystyttiin havaitsemaan helposti ja systemaattisen virheen olemassaolo oli epäolennaista trendianalyysin luonteen takia. Forecalta ei saatu Vantaankaan konttorin suhteen tietoa heidän toimittamiensa ennustetietojen varmuudesta ja toteutumistodennäköisyydestä. Analyysissä hyödynnettiin kuitenkin ainoastaan aina sen hetkistä arvoa, jolloin virhe on huomattavan pieni sekä arvoja hyödynnettiin vain analyysissä, joissa etsittiin rakennusten käyttäytymistrendejä ja eksaktit arvot ovat toissijaisia.

Tehoanalyysissä hyödynnettiin aina saman hetken mittaustietoja meno- ja paluuviesien lämpötiloissa. Täsmällisen tehonkulutuksen määrittely olisi vaatinut luonnollisesti paluuviesien lämpötilan arvon mittaamista veden kuljettua patteriverkoston läpi. Patteriverkoston aivan eksaktin viipymän määrittely ei ollut tutkimuksen kannalta mielekästä, koska konttorin kokoisen rakennuksen viipymä on 15 minuutin luokkaa ja paluuviesien keskimääräinen lämpötilavaihtelu peräkkäisten arvojen välillä on 0,13 °C. Näin pieni vaihtelu ei vaikuta tehollaskuihin tai trendien muotoon.

Kuten muistakaan kohteista, ei Vantaan konttorilta saatu läsnäolotietoja. Rakentamismääräyskokoelman D5 avulla kuitenkin arvioitiin keskimääräinen ihmisten aiheuttama kuorma. Henkilöiden lämpötehona käytettiin arvoa 70 W [36] ja rakennuksessa työskentelee noin 100 henkilöä. Tällä perusteella virka-aikana ihmisten aiheuttama teho on 7 kW. Sähkönkulutukseen tulee mittausten perusteella keskimääräisesti virka-aikana 4,5 kW nousu. Näin ollen ihmisten ja sähkölaitteiden tuottama maksimilämpökuorma olisi 11,5 kW. Vantaan konttorilla on kuitenkin käytössä ilmastointi ja virka-aikana sen jäähdyttävä vaikutus on keskimäärin 16 – 20 kW. Kuorman ja jäähdytysvaikutuksen ollessa näin samansuuruiset, on mahdotonta määritellä kuormien sisälämpötilaa nostavaa vaikutusta ilman tarkempia tietoja läsnäolosta ja kuormien jakautumisesta.

3.2.3 Tarkastelun johtopäätökset

Luvussa 3.2.2 esitellään Vantaan konttorin data ja tehdään sen perusteella havaintoja kiinteistöstä. Tässä luvussa siirrytään tekemään johtopäätöksiä havaintojen avulla ja pohtimaan syitä niiden taustalla.

Patteriverkoston tehoanalyysi aloitettiin vertaamalla poikkeamaa toteutuneen tehon ja riippuvuuskaivran välillä kellonaikaan. Nämä kuvaajat esitettiin kuvissa 50 – 52. Erikseen oli piirretty kaikkien päivien, arkipäivien ja viikonloppujen tiedot. Kaikista kuvaajista oli huomattavissa, että poikkeama oli positiivinen öisin ja virka-

aikaan negatiivinen. Positiivinen poikkeama tarkoittaa, että tehoa kuluu enemmän verrattuna riippuvuusikäyrään samalla menoveden lämpötilalla ja negatiivinen päinvastaista. Näin ollen yhtälön 3 mukaan virtaaman pysyessä vakiona ja poikkeaman ollessa positiivinen meno- ja paluuviesien lämpötilojen erotus on suurempi tehonkulutuksen ollessa suurempi. Siis öisin meno- ja paluuviesien lämpötilojen erotus on Vantaan konttorilla selkeästi riippuvuusikäyrän antamaa suurempi, ja päivisin erotus on huomattavan pieni. Patteriverkosto ei siis luovuta juurikaan tehoa huoneisiin vaikka menovedenlämpötila on suhteellisen korkealla. Tästä voidaan päätellä, että sisälämpötilat ovat jo kohdallaan ja olisi hyvinkin mahdollista laskea menoveden lämpötilaa.

Tehoanalyysin poikkeaman vertaaminen auringon säteilyyn nähdään kuvissa 53 – 55. Kuten todettu tehojen poikkeaman ja auringon säteilyn välinen yhteys näkyy kuvissa selvästi niin, että aurinkoisella säällä poikkeama on negatiivinen. Näin ollen rakennus ottaa vähemmän lämmitysenergiaa patteriverkostosta aurinkoisilla säillä. Koska rakennuksessa oleskelu ja aurinkoisuus sijoittuvat ajallisesti samaan jaksoon, on arkipäivien datasta vaikea aukottomasti päätellä yhteyttä auringon säteilyn ja patteriverkoston tehonkulutuksen välillä. Viikonloppujen kuvaajasta 55 voidaan kuitenkin nähdä aurinkoisina hetkinä tehojen välisen poikkeaman olevan negatiivinen, joten voidaan todeta aurinkoisuuden todellakin aiheuttavan rakennukseen kuormaa, joka johtaa tehontarpeen laskuun.

Tehojen välistä poikkeamaa verrattiin tehoanalyysissä viimeiseksi sisälämpötiloihin, mikä on esitetty kuvissa 56 – 64. Kellarin sisälämpötilojen suhdetta poikkeamiin tehojen välillä verrattiin kuvaajissa 56, 59 ja 62. Mikään kellarin kuvaaja ei antanut viitettä siitä, että sisälämpötilalla ja tehojen välisellä poikkeamalla olisi erityistä riippuvuutta. Tästä voidaan päätellä, että kellarin sisälämpötilaan ei vaikuta juurikaan lämpökuormat vaan sitä pystytään ohjaamaan tehokkaasti suoraan säättämällä menoveden lämpötilaa ulkolämpötilan perusteella. Ensimmäisen ja toisen kerroksen sisälämpötilat (kuvat 57, 58, 60, 61, 63 ja 64) taas ovat selkeästi riippuvuussuhteessa tehojen väliseen poikkeamaan. Matalimmilla sisälämpötiloilla poikkeama on positiivinen kun taas korkeimmilla negatiivinen. Tästä voidaan tulkita, että ensimmäisessä ja toisessa kerroksessa sisälämpötilan ollessa korkealla rakennus tarvitsee vähemmän tehoa kuin ulkolämpötilan mukaan säädetty menovesi luovutaisi. Erilaiset lämpökuormat aiheuttavat siis sisälämpötilan kasvun korkeammalle kuin lämmitysjärjestelmä lämmittäisi ulkolämpötilan perusteella.

Tehoanalyysissa päästään siihen lopputulokseen, että olisi hyvinkin järkevää siirtä ulkolämpötilaperusteisesta säädöstä tehoerusteiseen. Tehoperusteisessa säätämisessä huomioidaan rakennuksen sisäisenkin tila meno- ja paluuviesien erotuksen avulla. Rakennuksen ottama teho on kuitenkin riippuvainen niin ulkolämpötilasta kuin käyttäjien, sähkölaitteiden ja säätötilan aiheuttamista kuormistakin.

Vaimennetun ulkolämpötilan menetelmän tehokkuuden tutkiminen aloitettiin vertaamalla mitattuja ja asetusarvokäyrästä perusteella laskettuja teoreettisia menovedenlämpötiloja. Tämä esitetään kuvissa 65 ja 66. Kuvissa esitetty mitattujen ja asetusarvokäyrän perusteella laskettujen menovesien lämpötilojen erotus ilmaisee, että vaimennetun lämpötilan menetelmällä menoveden lämpötila on päivisin korkeammalla kuin asetusarvokäyrän perusteella. Kuvaajasta 66 nähdään miten si-

sälämpötila nousee päivisin turhan korkeaksi ja siis vaimennetun ulkolämpötilan menetelmällä nostetaan menoveden lämpötilaa liian paljon päivisin.

Vaimennetun ulkolämpötilan menetelmän analyysia jatkettiin tutkimalla sen kuluttamaa tehoa ja teoreettista asetusravokäyrän perusteella laskettua tehoa, kuten kuvassa 67 nähdään. Lisäksi tehojen perusteella laskettiin energiavertailu, joka esitetään kuvassa 68. Tehojen vertailussa nähdään, että käyrät ovat huomattavan yhtenevät ja kuvaajan perustella on haastava vetää johtopäätöksiä kummankaan menetelmän paremmuudesta tehonkulutuksen saralla. Aikavälillä 27.3. – 2.4. huomataan suurimmat erot. Teoreettinen käyrä käyttäytyy tällöin luonnollisesti juuri niin kuin se on määritelty. Vaimennetun ulkolämpötilan tehon käyttäytymistä ei taas voida päätellä menetelmän logiikasta, joten kyseisen ajanjakson vaihtelun on johduttava satunnaisesta häiriöstä. Vaikka tehokäyristä ei voi päätellä kummankaan menetelmän paremmuutta, energiankulutuskäyrä antaa selvempiä tuloksia. Kahden kuukauden aikajakson perusteella nähdään, että vaimennetun ulkolämpötilan menetelmä on kuluttanut kumulatiivisesti vähemmän energiaa. Tarkempi tarkastelu osoittaa kuitenkin, että myös energiankulutuskäyrät on huomattavan yhtenevät ja ero niiden välille syntyy ajanjaksolla 17.3. – 2.4., jolloin mittauksissa ilmenee häiriötä. Voidaan siis tulkita, että vaimennetun ulkolämpötilan menetelmä ei tuo kiinteistölle säästöjä verrattuna perinteiseen lähestymistapaan.

Lopulta Vantaan konttorille tehtiin samat analyysit kuin muille kohteille luvussa 3.1. Sisälämpötilan ja kellonajan yhteyttä tutkittiin kuvissa 69 – 72. Kuvien perusteella sisälämpötila nousee kiinteistössä päivisin. Tämäkin osoittaa, ettei kohteen säätöjärjestelmä ole optimi. Lämmön nousua aiheuttaa arkisin tiloissa oleskelu ja sähkölaitteet, mutta myös viikonloppujen kuvissa on huomattavissa sisälämpötilan kasvua, jolloin lämpökuorma on säätilan eli erityisesti auringon aiheuttamaa. Sisälämpötilaa verrattiin lopuksi auringon säteilyyn kuvissa 73 – 76. Auringon säteilylkin on yhteytensä sisälämpötilaan kiinteistössä ja korkeilla aurinkoisuuden arvoilla on huomattavissa sisälämpötilan minimiarvojen olevan suurimmillaan. Arkisin toki tässäkin tapauksessa kiinteistössä oleskelu ja aurinkoisuus sijoittuvat samalle ajanjaksolle, joten sisälämpötiloja ei voida selittää pelkästään aurinkoisuudella. Viikonloppuisin on kuitenkin huomattavissa aurinkoisuuden vaikutus sisälämpötilaan. Riippuvuussuhde ei ole niin suoraviivainen, mutta kun tutkitaan kellonaikojen ja sisälämpötilan yhteyttä todetaan korkeimpien lämpötila-arvojen ilmenevän vasta illalla. Kiinteistö siis mahdollisesti varaa auringon säteilyn aiheuttamaa lämpöä ja lämpövaikutus aiheuttaa korkeimmat sisälämpötilat vasta viiveellä.

4 Ratkaisumahdollisuudet

Tässä luvussa esitellään tarkemmin neljä erilaista valmista lähestymistapaa rakennusten lämmityksen säätöön ja analysoidaan niiden jatkokehitysmahdollisuuksia. Ensimmäiseksi pureudutaan Schneider Electricin omiin ratkaisuihin luvuissa 4.1 ja 4.2. Luvussa 4.3 esitellään tilakonelähestyminen rakennuksen lämmitysprosessin mallintamiseen. Viimeiseksi luvussa 4.4 perehdytään patentoituun vahvasti fysikaalisiin ilmiöihin perustuvaan lähestymistapaan.

4.1 OTC

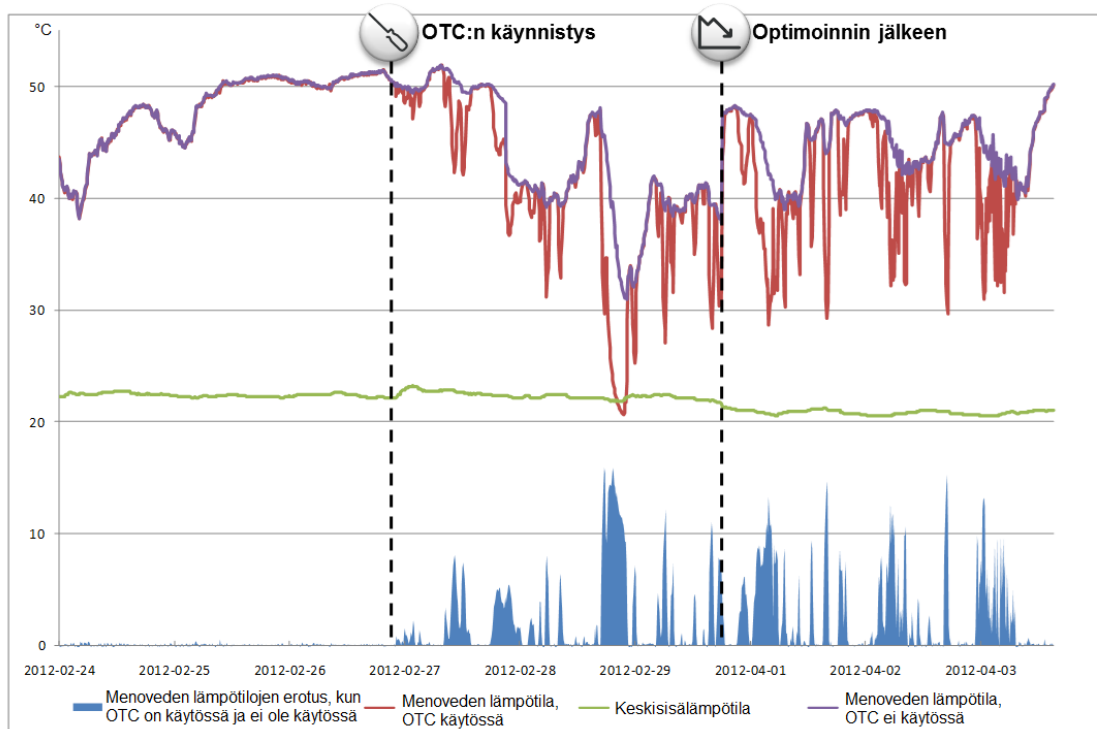
Outdoor Temperature Control (OTC) on Schneider Electric Buildingsin Ruotsin yksikössä kehitetty energiaa säästävä ratkaisu sisälämpötilan pitämiseksi tasaisena ulkolämpötilan vaihtelusta huolimatta. Erityisesti keväille ja syksyille tyypilliset nopeat muutokset ulkolämpötilassa aiheuttavat helposti poikkeamia sisälämpötilassa. OTC mukautetaan jokaiselle kiinteistölle sen erityispiirteiden mukaan. [1]

OTC eroaa muista sisälämpötilaa tasaisena pitävistä järjestelmistä nopean, noin vuoden mittaisen, takaisinmaksuaikansa ansiosta. OTC ei tarvitse toimiakseen erillisiä sääennustetietoja tai omaa sääasemaa vaan konsepti toimii ulkolämpötilan muutosten tunnistuksen avulla. Ainoana erillisenä investointina pitää hankkia uuden aikainen ulkolämpötilamittari. Lisäksi OTC voidaan asentaa sellaisenaan Schneider Electricin rakennusautomaatiojärjestelmään ja lisävarusteena järjestelmään saa myös kauko-ohjauspalvelun, jolla järjestelmän energiankulutusta ja -kustannuksia on helppo ohjata ja valvoa. [1]

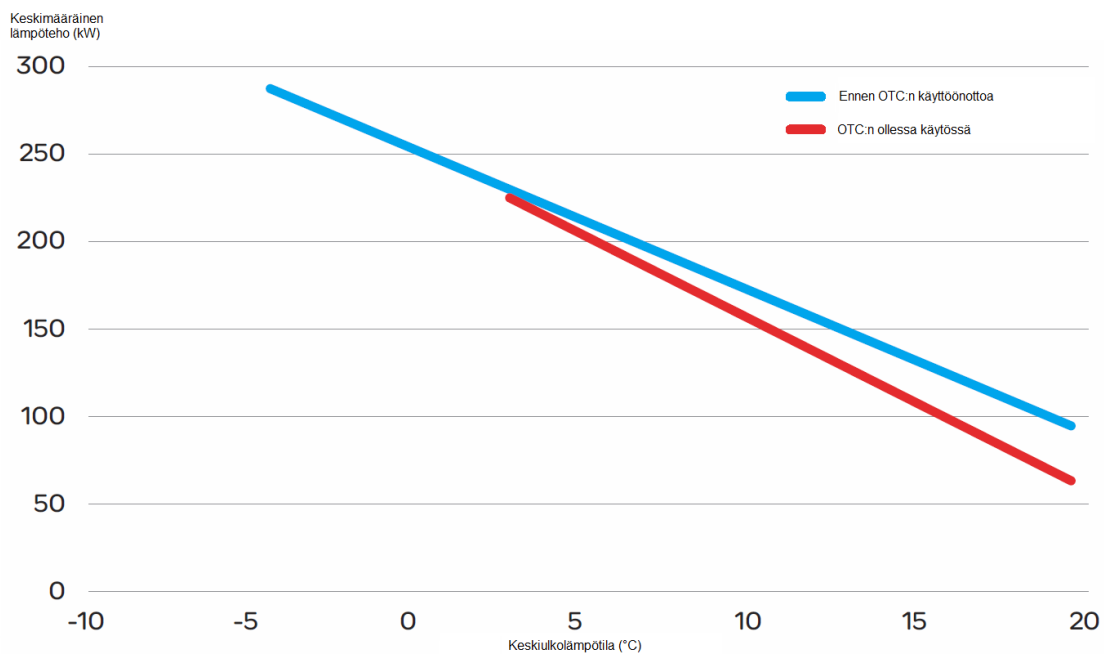
OTC-konseptia voidaan hyödyntää Ruotsissa yleisesti käytössä olevan patteriverkoston vesipumpun pysäytyslogiikan kanssa (LPS). LPS täydentää OTC:ta laskeamalla rakennuksen energiatarpeen ja näiden yhteisen vaikutuksen luvataan laskevan energiakustannuksia 5 – 8 % verrattuna perinteiseen HVAC-järjestelmään. [1]

Kuvassa 77 nähdään menoveden lämpötilan ja sisälämpötilan muutokset OTC:n käyttöönoton jälkeen. Kuva havainnollistaa, miten OTC:n avulla patteriverkostoon voidaan pumpata huomattavasti matalamman lämpöistä vettä sekä miten sisälämpötilaa voidaan laskea muutamalla asteella ja pitää lämpötila tasaisena. Kuva 78 taas näyttää, miten rakennuksen tarvitsema lämpötehon määrä laskee käytettäessä OTC:ta.

Ruotsissa on totuttu säätämään patteriverkostoa eri tavalla kuin Suomessa ja pumppujen pysäyttämistä hyödynnetään melko paljon. Vaikka säätilat ovat Suomessa vastaavia kuin Ruotsissa ja näin ollen OTC olisi toimintalogiikaltaan pätevä, ei Suomen rakennuskannan laitteisto välttämättä ole valmis samanlaisiin metodeihin.



Kuva 77: Menoveden lämpötilan ja sisälämpötilan muutokset OTC:n käyttöönoton jälkeen [1]



Kuva 78: Keskimääräisen lämpötehon suhde keskiulkolämpötilaan ennen OTC:n käyttöönottoa ja sen jälkeen [1]

4.2 Sääennustepohjainen malli

Schneider Electric Buildingsissa on kehitetty sääennusteita hyödyntävää ennakoivaa algoritmia rakennusten lämmityksen säätöön. Lähtökohtana ratkaisulle on ollut suomalaiset rakennukset, joten algoritmi on tarkoitettu toimivaksi tyypillisissä vesikiertoisissa lämmitysjärjestelmissä. Olennaista kehityksessä on myös ollut, että ratkaisu voidaan asentaa jo olemassa oleviin järjestelmiin. Algoritmi hyödyntää patteriverkoston menoveden lämpötilan säätöön sääennusteita, joista erityisesti tulevia ulkolämpötiloja. Tarkempaa kuvausta ratkaisusta ei voida antaa yrityssalaisuuksien vuoksi.

Schneider Electric Buildingsin kehittämän ennakoivan algoritmin potentiaalia analysoitiin vertaamalla sen antamia laskennallisia arvoja Vantaan konttorin arvoihin. Luvussa 3.2.2 vertailtiin Vantaan konttorilla jo käytössä olevaa vaimennetun ulkolämpötilan menetelmää teoreettiseen asetusarvokäyrän perusteella määriteltynä menetelmään. Samaa metodologia hyödynnettiin myös ennakoivan algoritmin potentiaalin tulkitsemisessa.

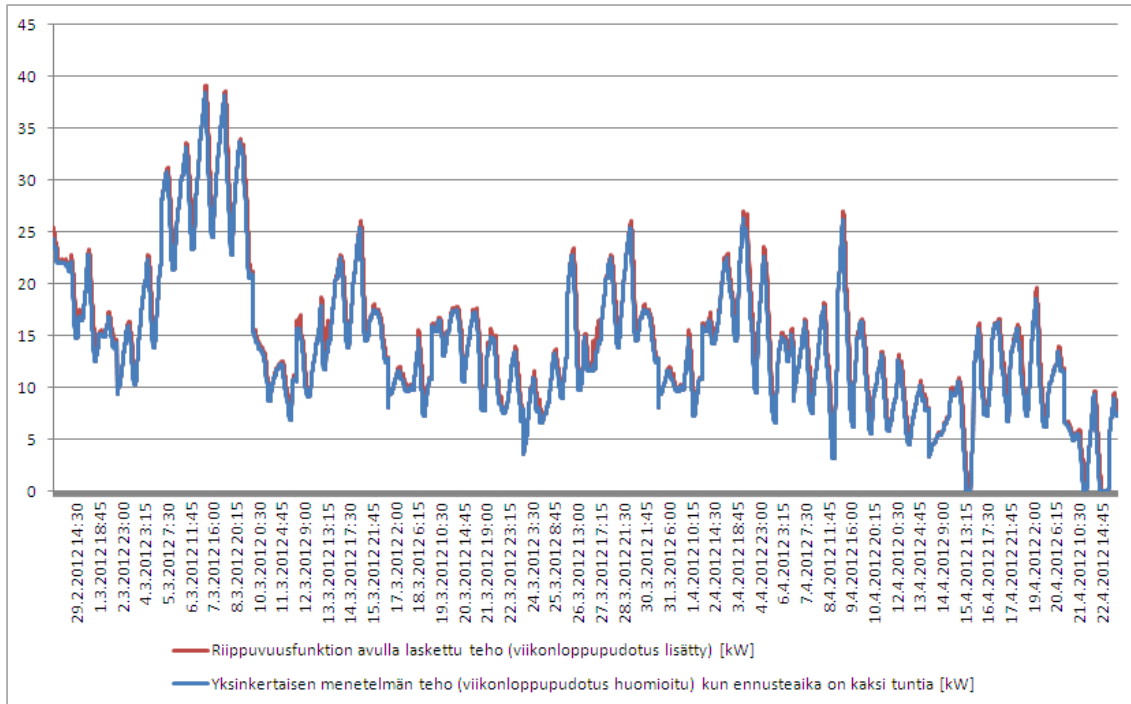
Ennakoivaa algoritmia vertailtiin Vantaan konttorin asetusarvokäyrästä perusteella laskettuun teoreettiseen menetelmään. Molempien menetelmien tehoarvot laskettiin yhtälöiden 4 ja 5 perusteella. Yhtälö 4 on määritetty Vantaan konttorin menovedenlämpötilan ja tehon suhteen avulla, joten tämä vertailu on spesifi kyseiselle kohteelle. Ennakoivan algoritmin toiminnan arvojen laskennassa hyödynnettiin toteutuneita säätötilan tietoja sääennusteiden sijasta, jotta välttyttiin sääennusteiden tuomista epävarmuustekijöistä ja virhemarginaaleista.

Kuvissa 79 – 81 esitetään tehdyn analyysin tulokset, kun ennakoivan algoritmin ajanjaksona on käytetty kahta tuntia. Kuvat 82 – 84 taas esittävät tuloksia, kun ajanjaksoksi on määritetty kuusi tuntia.

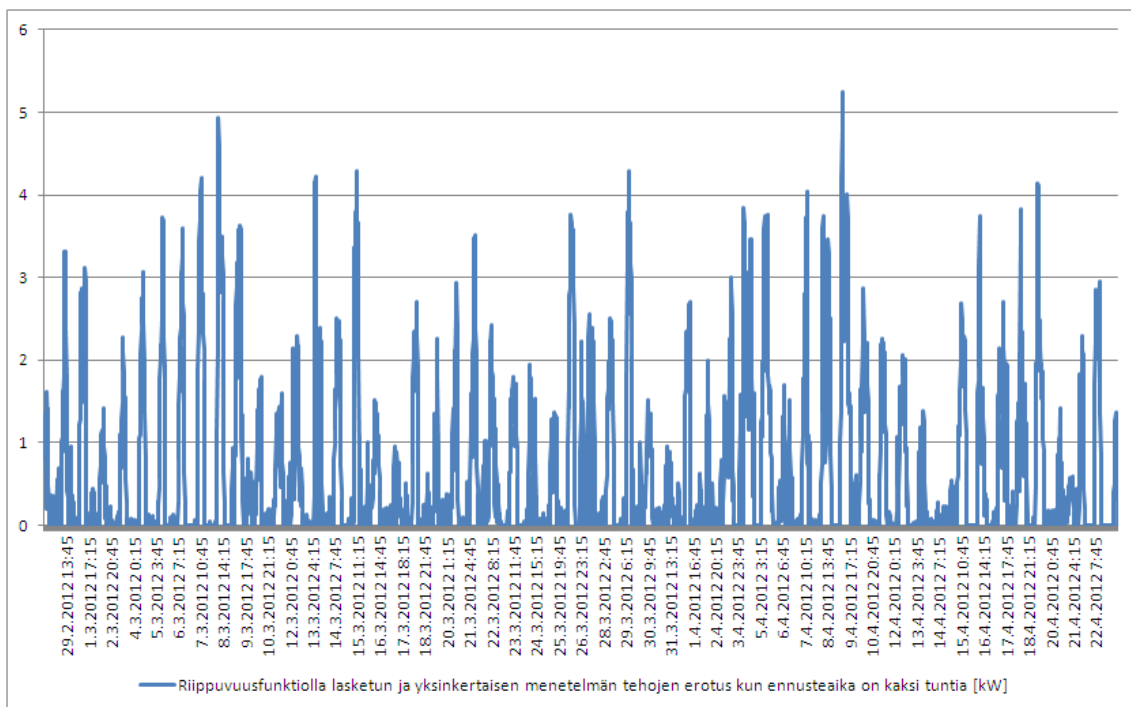
Pelkän asetusarvokäyrän ja ennakoivan algoritmin tehot ovat esitetty kuvassa 79. Koska kyseessä on teoreettiset arvot, ei yksittäisiä virhepisteitä ole kuvissa nähtävissä. Käyrät seuraavat huomattavan selkeästi toisiaan ja eroja on vaikea huomata. Voidaan kuitenkin todeta pelkän asetusarvokäyrän perusteella lasketun menetelmän kuluttavan hieman enemmän tehoa lähes koko ajan. Tämä onkin helpommin huomattavissa kuvassa 80, johon on piirretty tehoarvojen erotukset. Huomataan, että erotus vaihtelee koko ajan nollan ja kuuden kilowatin välillä.

Tehoerojen vaikutus ilmenee kuvassa 81, jossa on piirrettynä kumulatiivinen energiankulutus ajanjaksolta. Hetkelliset 15 minuutin ajanjakson tehoarvot kerrottiin ajanjakson pituudella ja näiden summasarjat asetettiin vertailuun. Kuvasta voidaan huomata, miten ennakoiva algoritmi kuluttaa tasaisesti vähemmän energiaa ja käyrien välinen etäisyys kasvaa jatkuvasti. Lopulta kahden kuukauden seuranta-jakson jälkeen erotus on tuhannen kilowattitunnin luokkaa.

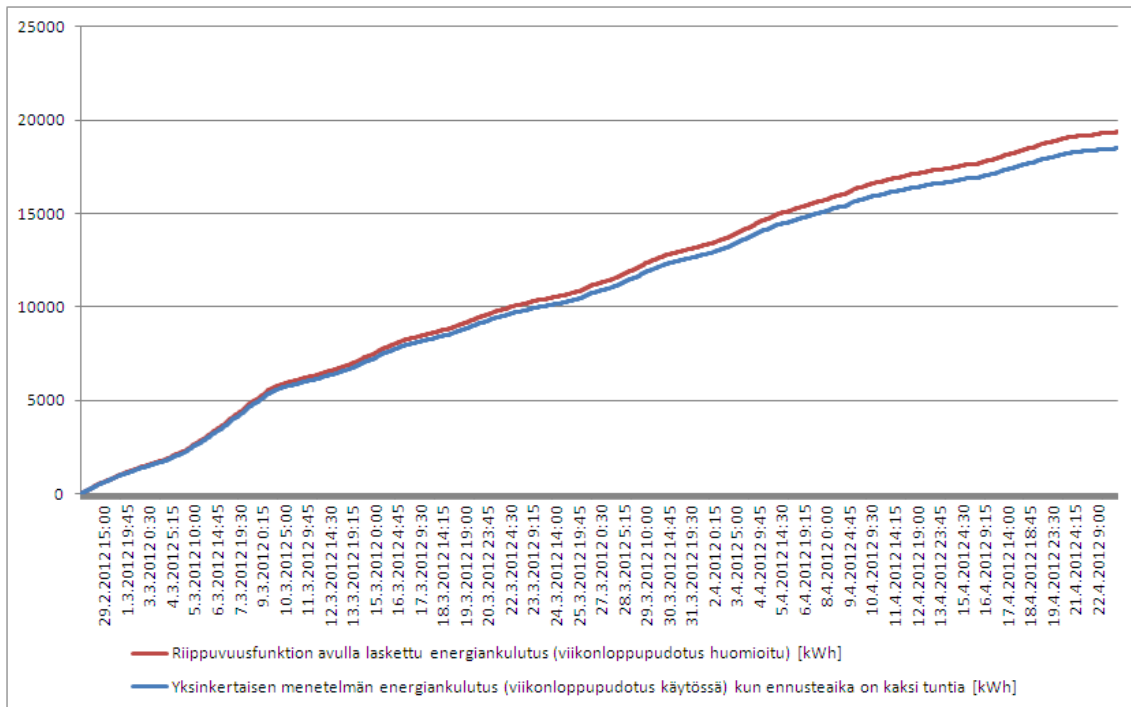
Kuvissa 82 – 84 toistettiin samat vertailut kuuden tunnin ajanjaksolle. Näin pitkällä ajanjaksolla voidaan helposti huomata jo tehokäyriä katselemalla kuvasta 82 ennakoivan menetelmän tehonkulutuksen mataluus. Kuva 83 kuvastaa selkeästi miten lähes jatkuvasti erotus on huomattava ja arvot ovat tuplaantuneet verrattuna kahden tunnin aikajakson analyysiin (kuva 80). Energiankulutuksen ero on huomattavissa jo viikon seurannan jälkeen ja ennakoivan algoritmin menetelmä onkin ku-



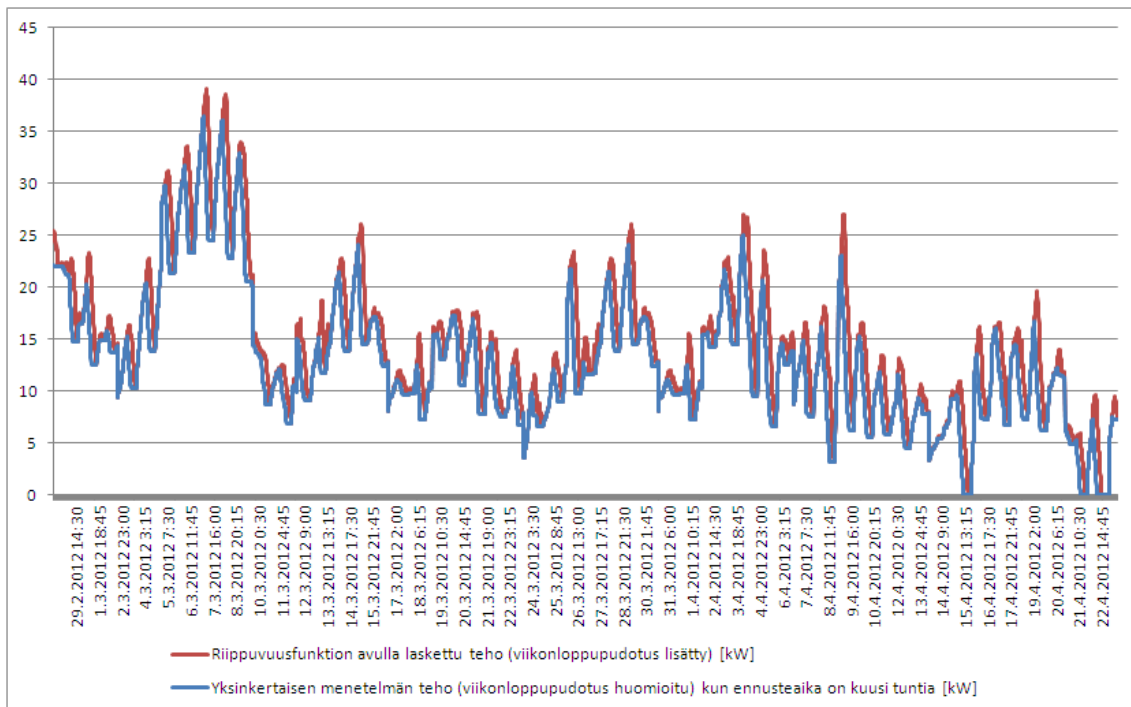
Kuva 79: Asetusarvokäyrästä ja ennakoivan menetelmän laskettujen tehojen vertailu kun ennusteaika on kaksi tuntia



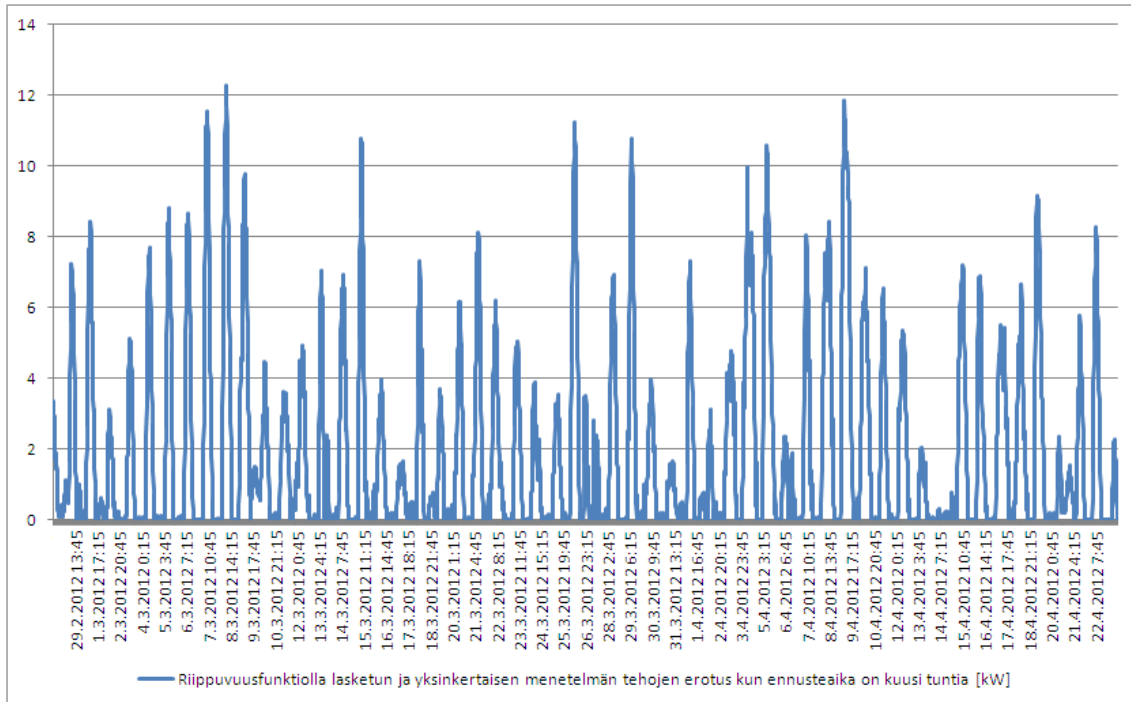
Kuva 80: Asetusarvokäyrästä ja ennakoivan menetelmän laskettujen tehojen erotus kun ennusteaika on kaksi tuntia



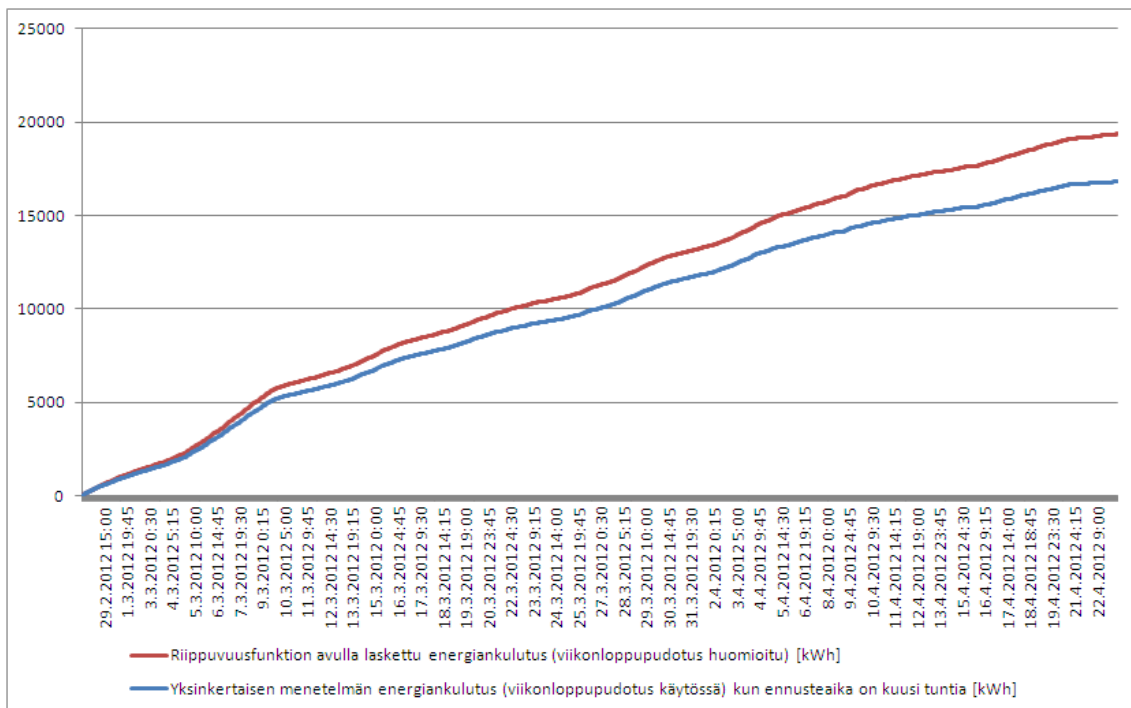
Kuva 81: Asetusarvokäyrästä ja ennakoivan menetelmän laskettujen kumulatiivisten energiankulutuksien vertailu kun ennusteaika on kaksi tuntia



Kuva 82: Asetusarvokäyrästä ja ennakoivan menetelmän laskettujen tehojen vertailu kun ennusteaika on kuusi tuntia



Kuva 83: Asetusarvokäyrästä ja ennakoivan menetelmän laskettujen tehojen erotus kun ennuste aika on kuusi tuntia



Kuva 84: Asetusarvokäyrästä ja ennakoivan menetelmän laskettujen kumulatiivisten energiankulutuksien vertailu kun ennuste aika on kuusi tuntia

luttanut koko kahden kuukauden seurantajakson jälkeen noin 3000 kWh vähemmän energiaa.

Ennakoivassa mallissa olennaisinta on, että se havainnollistaa, miten huomattavan helposti voidaan vähentää rakennuksen energiankulutusta ja kuinka algoritmimuutoksilla myös olemassa olevissa järjestelmissä voidaan säästää huomattavia määriä energiaa.

Malliin määriteltävä ajanjakson maksimipituus on riippuvainen rakennuksen aikavakiosta. Mitä varaavampi rakennus on, sitä pidempää ajanjaksoa voidaan menetelmässä käyttää. Huonosti varaavilla ja vetoisilla rakennuksilla ajanjakso on pidettävä lyhyenä ja jyrkimmässä rakennuksissa ajanjakso voi olla huomattavankin pitkä. Sisäilmastollisesti vaativimmissa kohteissa ennakoivan algoritmin toimivuutta voidaan vielä varmistaa sisälämpötilamittauksilla ja takaisinkytkä arvot järjestelmään.

4.3 Tilakonepohjainen rakennuksen lämmityksen mallintaminen

Tässä luvussa käsitellään Aalto-yliopistossa ja VTT:ssä kehitettyä tilakonepohjaista mallinnusmenetelmää rakennuksen lämmitykseen [26]. Luvussa 4.3.1 esitellään ratkaisu ja luvussa 4.3.2 analysoidaan menetelmän potentiaalia sekä ideoidaan menetelmän jatkokehitysmahdollisuuksia.

4.3.1 Ratkaisun esittely

Tilakonemalli on uudenlainen lähestymistapa rakennusten automatisointiin. Mallissa kuvattu lämmitysteho perustuu edellisiin syötteisiin ja tuloihin, jolloin se kuvaa sen hetkistä systeemin tilaa. Mallin identifioinnissa kerätään, lajitellaan ja säilötään havaintoja sekä hyödynnetään tietojen keskinäisiä suhteita. Suhteiden hyödyntäminen mahdollistaa yhtenäisen datasetin, joka kuvaa HVAC-prosessin karakteristista ja dynaamista käyttäytymistä. Tilakonemalli ei tarvitse sofistikoituneita algoritmeja, jolloin se toimii hyvin pienillä laajan muistikapasiteetin mikroprosessoreilla. Lähestymistavan ideana on kerätä prosessista mittauksia diskreetillä aikavälillä ja tallentaa muokkauksen kautta data muistiin käyttäen erityistä osoitejärjestelmää. Lopulta on-line tarkastuksen jälkeen kerätty data muodostaa yhtenäisen dynaamisen mallin, joka arvioi simuloidun rakennuksen lämmitystehoa.

Lämpötase voidaan ilmaista yksinkertaistetusti yhtälöllä 6. Kun yhtälö diskretoidaan ja siihen lisätään P-tyyppinen säädin, voidaan se kirjoittaa yhtälönä 7.

$$C_R \frac{du_R(t)}{dt} = \sum_i h_{si} A_i [u_i(t) - u_R(t)] + C_f u_o(t) - C_e u_R(t) + q_C(t), \quad (6)$$

jossa

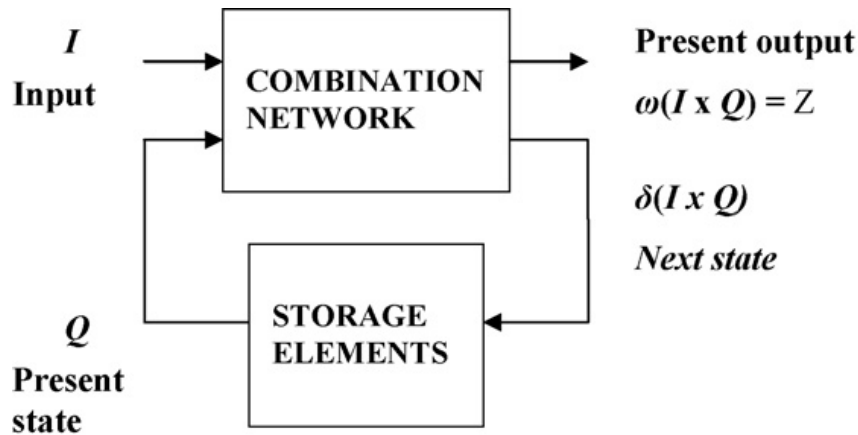
| | |
|----------|---|
| C_R | tilan ilman lämpökapasiteetti, J/K |
| C_f | tuloilman lämpökapasiteetti, J/K |
| C_e | poistoilman lämpökapasiteetti, J/K |
| h_{si} | pinnan i ominaislämpökapasiteetti, J/(m ² K) |
| A_i | pinnan i ala, m ² |
| u_R | sisälämpötila, K |
| u_o | ulkolämpötila, K |
| u_i | pinnan i lämpötila, K |
| q_C | konvektiolämpökuormat, J |

$$q(t) = \sum_{i=1}^m a_i q(t-i) + \sum_{j=1}^n b_j u_1(t-j) + \cdots + \sum_{p=1}^r b_p u_k(t-p), \quad (7)$$

jossa

| | |
|------------------------------|--|
| $q(t)$ | lämpöteho, W |
| $u_k(t), k = 1, 2, 3, \dots$ | huone-, pinta- ja ulkolämpötilat sekä kuormien vaikutukset |
| a_i, b_j, \dots, b_p | tuntemattomia muuttujia |

Tilakonepohjaisella mallilla lähestytään yhtälössä 6 esitettyä lämmitysprosessia black box -periaatteella. Syötteinä käytetään havaintoja ympäristöstä ja ulostulona lämmitystehoa. Kuten yhtälössä 7, lämpöteho q riippuu sekä nykyisistä syötteistä että menneisyyden syötteistä ja ulostuloista. Järjestelmällä tulee siis olla muistia, johon säilöä tilahistoriansa. Kuvassa 85 esitetään tilakoneen toimintaperiaate. Siinä I kuvastaa järjestelmän syötteitä ja Z ulostuloja. Q:lla kuvataan järjestelmän tiloja. Symboleilla δ ja ω kuvataan funktioita seuraavalle tilalle ja ulostuloille.



Kuva 85: Tilakoneen toimintaperiaate [26]

Mallin rakennus aloitetaan keräämällä ja tallentamalla prosessidataa diskreetein

aikaväleihin. Jokainen tallennus sisältää yhtälön 7 mukaiset mittaukset, jotka voidaan ilmaista myös yhtälöllä 8. Yhtälön informaatio koskee siis ainoastaan yhtä järjestelmän tilaa. Tällöin minkä tahansa mittauksen muuttuessa vaihtuu myös koko järjestelmän tila. On siis olennaista valita harkiten mittaustarkkuudet, koska tarkkuuden kasvaessa kasvaa myös tarvittava muisti. Sama havaintojen kombinaatio tallennetaan järjestelmään vain kerran.

$$q(t) = f(q_{t-1}, q_{t-2}, \dots, q_{t-m}, \\ u_{1,t-1}, u_{1,t-2}, \dots, u_{1,t-n}, \dots, u_{k,t-1}, u_{k,t-2}, \dots, u_{k,t-r}) \quad (8)$$

Mallin datan määrä voi kasvaa erittäin suureksi. Kaiken datan pitäminen muistissa ei kuitenkaan ole välttämätöntä. Yhtälön 8 oikealla puolella olevat muuttujat ovat tiedettyjä ja niiden kartoitus on ennakoitu. Näin ollen ulostulo $q(t)$ pitää ainoastaan kirjoittaa erikseen muistiin.

Malli luodaan kahdessa eri vaiheessa. Ensin seurataan prosessia ja tallennetaan syötteet ja ulostulot. Tämän vaiheen jälkeen muistissa on sekä täytettyjä että tyhjiä paikkoja. Tyhjien paikkojen olemassaolo johtuu siitä, että seurantajakson aikana prosessi ei todennäköisesti kohtaa jokaista mahdollista tilannetta. Seuraavassa vaiheessa tyhjät muistipaikat täytetään approksimaatioilla, joissa hyödynnetään yhtälön 8 p-dimensioista euklidista avaruutta ja lähimmän naapurin sääntöä.

[26]

4.3.2 Ratkaisun potentiaalin analysointi ja jatkokehitysideat

Analysoitaessa luvussa 4.3 esiteltäviä tilakonepohjaista mallia rakennuksen lämmitykseen ei ollut saatavissa kunnollista dataa, jota olisi ollut mahdollista verrata työn kohteista saatuihin tuloksiin. Näin ollen potentiaalin analysointi ja ideat jatkokehitystä varten on tehtävä suoraan artikkelin [26] pohjalta.

Kuten ratkaisun esittelyssä luvussa 4.3.1 kerrotaan, on tilakonepohjainen malli black box -tyyppinen. Black box -malleja on perinteisesti vieroksuttu, koska nimensä mukaisesti niiden sisältöä ei tunneta tarkasti. Malliin on ollut hankala luottaa vain toiminnan perusteella.

Tilakonemalli pyrkii ratkaisemaan ongelmia, jotka ilmenevät kun joudutaan mallintamaan rakennuksen fysikaaliset ominaisuudet tarkasti. Mallissa ei joudutakaan määrittelemään fysikaalisia suureita, mikä vähentää huomattavasti työtä. Tarkkojen fysikaalisten suureiden puuttuminen myös vähentää niiden määrittelyssä tapahtuvia virheitä ja tästä johtuvaa vääristymää säädössä. Tarkkojen määrittelyjen välttämällä kuitenkin päädytään muihin ongelmiin. Kun tarkkoja suureita ei määritetä, joutuu malli oppimaan kohteen käyttäytymisen itse. Tämä johtaa pitkäkestoiseen prosessiin ja aivan nollasta aloittavan oppivan prosessin käyttöönottoaika on huomattavan pitkä. Tämä ei ole energiansäästön eikä järjestelmää toimittavan yhtiönkään puolesta optimaalista.

Mallin ensimmäinen vaihe on kohteen tilojen ja sen mukaisten syötteiden ja ulostulojen opettelu. Koska toisessa vaiheessa järjestelmä täydentää tyhjien tilojen arvot lähimpien naapurien avulla, voidaan ensimmäinen vaihe pitää kestoltaan lyhyenä.

Tosin arvojen approksimointi on aina vähemmän tarkkaa kuin aidot mittaukset. Näin ollen mitä lyhempi oppimisjakso itsessään on, sitä epätarkempi mallista tulee ja virheiden todennäköisyys kasvaa.

Tilakonemallia mainostetaan keveänä, koska se suorittamiseen ei vaadita hienostuneita algoritmeja ja näin ollen raudalta ei vaadita paljon suoritustehoa. Vaikka prosessoritehoa ei vaadita juurikaan, järjestelmä tarvitsee tallennettuja tilatietojaan varten huomattavat määrät muistia. Muistin tarpeen määrään vaikuttaa, miten tarkasti malli halutaan kuvata. Suurempi määrä informaatiota lisää mallin tarkkuutta, vähentää virheiden ja epätarkkuuksien todennäköisyyttä sekä parantaa säädön onnistumismahdollisuutta. Suuri määrä dataa kuitenkin lisää myös aikaa, joka järjestelmällä menee sen käsittelyyn. Vaikkakin kyseinen tilakonepohjainen malli on hionut muistinkäsittelyn erittäin tehokkaaksi, lisää datan määrä aina tietojen etsinnän kestoa.

Kyseisen mallin hyviä puolia on ehdottomasti sen tuore lähestymistapa perinteiseen säätöongelmaan. Erityisen hienoa siinä on mahdollisuus ottaa huomattava määrä suureita mukaan ja potentiaalisesti jopa lisätä syötteiden määrää kesken järjestelmän toiminnan. Erityisesti malliin tulisi harkita sääennustetietojen huomioinnin lisäämistä.

4.4 Fysikaalisperusteinen rakennuksen lämmityksen säätöta- pa

Tässä luvussa käsitellään Ruotsin ilmatieteenlaitoksen (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, SMHI) kehittämää menetelmää rakennuksen lämpötilan säätöön sääennusteiden perusteella. Luvussa 4.4.1 esitellään ratkaisu ja luvussa 4.4.2 analysoidaan menetelmän potentiaalia.

4.4.1 Ratkaisun esittely

Luvussa esitellään fysikaalisperusteinen ratkaisu, jonka pyrkimyksenä on säätää rakennuksen lämmitys tietylle tasolle minimoiden samalla energiankulutuksen. Menetelmä pyrkii ratkaisemaan ongelman, jossa joko ulko- tai sisälämpötilan mukaan säädetty lämmitys toimii viiveellä suhteessa sään vaikutuksiin ja rakenteiden hitauteen. Ratkaisun perustarkoituksena on hyödyntää ilmaisen energioita rakennuksen lämmityksen säädössä. Tätä varten tarvitaan ennustava säätömenetelmä, joka perustuu rakennuksen lämpötasapainolaskelmiin. [33]

Ratkaisussa hyödynnetään ekvivalenttilämpötilaa lämmityksen säätöön. Ekvivalenttilämpötila lasketaan ulkoisten lähteiden nettolämpötilan perusteella. Näiden välillä oleva lineaarinen riippuvuus kuvastaa säätilan vaikutusta. Koska ekvivalenttilämpötila lasketaan korvaamaan todellista ulkolämpötilaa, voidaan menetelmää soveltaa sekä uusissa että jo olemassa olevissa säätöjärjestelmissä. [33]

Rakennuksen lämpötase määritellään yhtälössä 9. Spesifeissä tapauksissa yksi tai useampi termi voidaan approksimoida nolaksi, jos ne ovat huomattavan vähäpätöisiä verrattuna muiden muuttujien arvoihin. [33]

$$N = C + I + F + G - EP - S, \quad (9)$$

jossa

| | |
|------|---|
| N | nettolämmitystarve, W |
| C | lämpöhäviöt rakennuksen vaipan läpi (katto, seinät ja ikkunat), W |
| I | lämpöhäviöt luonnollisessa ilmanvaihdossa, W |
| F | lämpöhäviöt koneellisessa ilmanvaihdossa, W |
| G | lämpöhäviöt maahan, W |
| EP | lämpökuorma sähkölaitteista ja asukkaista, W |
| S | lämpökuorma auringon säteilystä ikkunoiden läpi, W |

Nettolämmitystarve ilmaistaan ekvivalenttilämpötilan termein, koska tällöin rakennusautomaatiojärjestelmissä voidaan käyttää ekvivalenttilämpötilaa suoraan ulkolämpötilan sijasta. Määritelmän mukaan patteriverkoston menoveden lämpötila on lineaarinen funktio ekvivalenttilämpötilan ja halutun sisälämpötilan erotuksesta. Ratkaisussa otetaan huomioon rakennuksen käyttötapa, ympäristö, säätiedot ja rakenteiden tekniset ominaisuudet. Jokaiselle rakennukselle on siis tehtävä omat laskelmansa, mutta usein voidaan myös hyödyntää tyypillisten rakennusten valmiita malleja. Esimerkiksi samalta aikakaudelta olevilla rakennuksilla voidaan olettaa olevan hyvinkin samat lämmönjohtokyvyt. [33]

Nettolämmitystehontarve ilmaistaan yksityiskohtaisesti yhtälön 9 mukaan. Tehontarve voidaan kuitenkin ilmaista myös toivotun sisälämpötilan ja ekvivalenttilämpötilan avulla kuten yhtälössä 10. Tämän voi kääntää helposti ekvivalenttilämpötilan yhtälöksi 11. Muuttujana k voidaan käyttää perinteistä asetusarvokäyrää säätämään menoveden lämpötilaa. [33]

$$N = k * (T_i - ET), \quad (10)$$

$$ET = T_i - \frac{N}{k} = T_i - \frac{1}{k}(C + I + F + G - EP - S), \quad (11)$$

jossa

| | |
|-------|--|
| N | nettolämmitystarve, W |
| ET | ekvivalenttilämpötila, °C |
| T_i | sisälämpötila, °C |
| k | rakennuksen tyypistä riippuva vakio, W/K |

Yhtälöt 12 – 15 esittävät yksinkertaisesti yhtälössä 9 esitettyjen suureiden laskentatavat.

$$C = u_e A_{vaippa} (T_i - T_o), \quad (12)$$

jossa

| | |
|--------------|--|
| C | lämpöhäviöt rakennuksen vaipan läpi (katto, seinät ja ikkunat), W |
| u_e | pinta-alapainotettu keskiarvo vaipan lämmönläpäisykertoimista (U-arvoista), W/m ² K |
| A_{vaippa} | vaipan ala, m ² |
| T_i | sisälämpötila, °C |
| T_o | ulkolämpötila, °C |

$$I = f(\Delta P)V\rho c_p(T_i - T_o), \quad (13)$$

jossa

| | |
|---------------|---|
| I | lämpöhäviöt luonnollisen ilmanvaihdon kautta, W |
| $f(\Delta P)$ | ilmanvaihdon aikavakio, joka ilmaisee ilman vaihtumiskerrat tunnin aikana sisä- ja ulkotilojen paine-eron ΔP funktiona, 1/h |
| V | vaihdetun ilman tilavuus, m ³ |
| ρ | ilman tiheys, 1,2 kg/m ³ |
| c_p | ilman lämpökapasiteetti, 1,0 kJ/kgK |
| T_i | sisälämpötila, °C |
| T_o | ulkolämpötila, °C |

Paine-ero ΔP riippuu sisä- ja ulkolämpötilojen erosta ja ulkona puhaltavan tuulen voimakkuudesta.

$$F = nV\rho c_p(T_i - T_o), \quad (14)$$

jossa

| | |
|--------|---|
| F | lämpöhäviöt koneellisessa ilmanvaihdossa, W |
| n | ilmanvaihdon aikavakio, 1/h |
| V | vaihdetun ilman tilavuus, m ³ |
| ρ | ilman tiheys, 1,2 kg/m ³ |
| c_p | ilman lämpökapasiteetti, 1,0 kJ/kgK |
| T_i | sisälämpötila, °C |
| T_o | ulkolämpötila, °C |

$$G = k_G A_{maa}(T_i - \bar{T}_o), \quad (15)$$

jossa

| | |
|-------------|---|
| G | lämpöhäviöt maahan, W |
| k_G | lämmönsiirtokerroin, W/m ² K |
| A_{maa} | maa-ala, m ² |
| T_i | sisälämpötila, °C |
| \bar{T}_o | vuoden ulkolämpötilojen keskiarvo, °C |

Lisäksi yhtälössä 9 määritellään nettolämmitystarpeen vähenevän ihmisten ja laitteiden lämpökuorman (EP) sekä auringon säteilyn kuorman (S) verran. Näiden laskenta on esitelty esimerkiksi standardissa SFS-EN ISO 13790 [32].

Jotta rakennuksen lämmönvaraavuutta voidaan hyödyntää, tulee lämmityksen olla ennakoivaa. Rakennuksen terminen inertia on yleensä yhteydessä sen aikavakioon ja voidaan ottaa huomioon ennustuksissa sekä viiveissä aikavakion perusteella laskettujen painokertoimien avulla. Hyödynnetyissä sääennusteissa resoluutiona tulee käyttää yhtä tuntia. [33]

4.4.2 Ratkaisun potentiaalin analysointi

Luvussa 4.4.1 esiteltiin fysikaalisperusteinen tapa säätää rakennuksen lämmitystä. Myöskään tätä menetelmää kuten luvun 4.3 tilakonepohjaista menetelmää ei ollut mahdollista analysoida suhteessa mittauksiin ja kohteiden dataan, joten tulkinnot oli tehtävä kirjallisuuden perusteella.

Fysikaalisperusteinen tapa on perinteinen lähestymistapa rakennusten säätöön. Siinä on aina ollut haasteena tarkkojen arvojen määrittely ja matemaattinen raskaus. Suurimmassa osassa tapauksista ei rakenteita ja niiden ominaisuuksia pystytäkään määrittämään eksaktisti tai määritelmien tekeminen on vaikeaa ja kallista. Uudiskohteissa pystytään laskelmat teoriassa tekemään suunnitelmien perusteella, mutta laskettu lämpötase ei välttämättä vastaa valmiissa rakennuksessa todellista. Vanhojen rakennusten rakentamisesta ei usein ole saatavissa yhtään informaatiota. Varmin tapa mallin määrittämiseen fysikaalisperusteisessakin menetelmässä on mittausten tekeminen. Mittauksia tarvitaan huomattavasti vähemmän kuin black box -tyypissä lähestymisessä ja ne ovat huomattavan erityyppisiä. Usein näiden fysikaalisten suureiden määrittäminen jääkin rahan, ajan ja osaamisen puutteen takia tekemättä tarkasti. Black box -tyyppiseen tapaan verrattuna fysikaalis pohjainen menetelmä on matemaattisesti raskaampi. Matemaattinen raskaus vaatii järjestelmältä suurempaa prosessitehoa. Vaikka fysikaalisperusteinen tapa onkin siis perinteinen, on sitä täysimittaisesti hyödynnetty melko vähän juuri tarkkuuden ja vaativan laskennan takia.

Myös kyseisessä menetelmässä ovat samat ongelmat. Menetelmän hyvänä puoleena on tosin järkevien olettamusten tekeminen, joiden perusteella on pystytty määrittämään rakennuksille olennaiset tunnusluvut tiettyjen valmiiden pohjien perusteella. Tällä tavalla pystytään keventämään sekä määrittelyosuutta että mahdollisesti laskentaa. Toki valmiiden mallien luomisessa on mahdollista, että niiden täsmäävyys kohteeseen on huono. Olennaista onkin tunnistaa merkittävät suureet ja keskittyä niiden pitävyyteen.

Menetelmän hyviä puolia on sen sovellettavuus olemassa oleviin järjestelmiin. Pystymällä huomioimaan suuren määrän muuttujia vaihtamalla vain yhtä signaalia tekee sen käyttöönotosta helppoa. Haasteena kuitenkin on, etteivät järjestelmän eri osa-alueet ymmärrä toistensa toiminnasta mitään ja potentiaalisessa epätasapainotilanteessa on vaikea lähestyä ongelmaa.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Työn tarkoituksena oli aluksi kartoittaa rakennusten lämpökäyttäytymistä ja energiankulutusta sekä rakennuksen lämmityksen säätöön käytettyjä uusia teknologioita. Erityisesti painotettiin ennakoivia ja sääennusteita hyödyntäviä menetelmiä.

Rakennuskannan koon kasvu ja laatutason nosto lisäävät energiankulutusta jatkuvasti enemmän kuin mitä säästötoimenpiteet tai energiatehokas uudisrakentaminen vähentävät [7]. Rakenteellisten uudistusten ja uusien säätöratkaisujen lisäksi pohjan energiatehokkuudelle luovat riittävä mittarointi sekä vaatimukset rakennuksen suunnittelussa ja rakentamisen toteuttaminen suunnitellusti [4]. Rakennuksen lämmityksen säädön onnistumisen tärkeimpinä kriteereinä voidaan pitää mukavuutta sekä taloudellisuutta, joka tarkoittaa myös pientä energiankulutusta. Onnistumisesta voidaankin tarkastella energiankulutuksen kannalta kolmella tavalla. Ensinnäkin hyvä säätöpiiri pitää huonelämpötilan asetusarvossaan hyvin ja säästää näin lämmitysenergiaa. Toiseksi hyvin asetusarvossa pysyvää huonelämpötilaa voidaan laskea asumismukavuuden kärsimättä. Lisäksi nopea huonekohtainen säätöjärjestelmä hyödyntää tehokkaasti ilmaisenergioita [24].

Yleisimpiä lämmönjakelujärjestelmiä eli vesikiertoisia järjestelmiä on perinteisesti säädetty suoraan ulkolämpötilan mukaan muodostamalla asetusarvokäyrä, jonka perusteella säädetään lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötilaa [34]. PID on vieläkin yleisin takaisinkytketty säätötapa rakennusautomaatiojärjestelmissä. PID-säätimien käyttö on kuitenkin rakennusautomaatiossa ongelmallista, koska suurin osa prosesseista on ajan suhteen muuttuvia sekä luonnostaan epälineaarisia. Epälineaarisuuden ja muutoksien ajan suhteen lisäksi ongelmana rakennusautomaatiossa on antureiden vähäisyys ja niistä saatavan datan informaatioköyhyys sekä epätarkkuus. Lisäksi A/D ja D/A -muuntimilla on huono resoluutio, ja näytteenotto ei ole riittävää trendeihin ja tiedon analysointiin [28].

Älykkäiden ja oppivien menetelmien soveltaminen on ollut vielä harvinaista rakennussektorilla [24], vaikka PID-säätimet voitaisiin korvata sumeaa logiikkaa, neuroverkkoja ja prosessimalleja hyödyntävillä säätimillä. Kuitenkin uusienkin säätimien robustisuus on vaikea taata erityisesti epälineaarisille ja yllättäville tapahtumille. Uudet säätimet ovat usein myös liian vaativia laskentatehollisesti huonolle laitteistolle [28].

Neuroverkkoja hyödynnetään yleisesti juurikin epälineaarisuusongelmien ratkaisemisessa [8]. Lisäksi niiden käyttämisessä rakennusautomaatiossa on muitakin hyötyjä. Ensinnäkin niiden käyttöönotto ja toimivuuden varmistaminen vaativat vähemmän määrittelyä ja työtä kuin perinteisten säätöjärjestelmien. Toiseksi poikkeamat ja häiriöt signaaleissa eivät aiheuta suuria ongelmia järjestelmän toiminnassa. Lisäksi verkon opittua rakennuksen käyttäytymismalli, sen vasteaika paranee huomattavasti [35]. Neuroverkkoja voidaan rakennuksissa hyödyntää esimerkiksi ennakoimaan toimintaa ja energiankulutusta sekä toimimaan kompensattoreina parantaen perinteistä takaisinkytkettyä säätöä [24].

Sumean logiikan säädin ei ole myöskään kovin herkkä epälineaarisuuksille. Rakennuksissa sumeaa logiikkaa voidaan hyödyntää robustiin lämpötilan säätöön, ottamaan huomioon yksilölliset tarpeet säädössä sekä minimoimaan ja ennakoimaan

energiankulutusta [24]. Taloteknisissä sovelluksissa sumeaa logiikkaa kuitenkin käytetään lähinnä lämmityksen säädön ongelmissa [17].

Uudet ennakoivat menetelmät auttavat rakennusautomaatiojärjestelmää hyödyntämään useampia osiaan systemaattisesti, ennustamaan tulevia kustannuksia, ennakoimaan sähkönkulutusta ja nostamaan takaisinkytketyn säätöpiirin robustisuutta [38]. Ennustavan säädön suurin hyöty on kuitenkin lämmönjakelujärjestelmän sopeuttaminen etukäteen lämmöntarpeen ennusteen mukaan [16]. Korkeamilla päätöksentekotasolla sääennusteiden avulla arvioidaan ekonomisia suureita kuten energiankulutusta. Lähimpänä järjestelmätasoa ennusteilla voidaan arvioida yksittäisiä suureita, kuten tuulen nopeutta tai auringon säteilyä [37]. Sääolojen ennustaminen on haastavaa, koska ne riippuvat huomattavan kompleksisista fysikaalis-kemiallisista ilmiöistä. Kaupallisten sääennustustoimittajien data ei välttämättä ole tarpeeksi yksityiskohtaista tarkkoja ennusteita vaativille tiukan toiminta-alueen kohteille kuten rakennusautomaatiojärjestelmille [37].

Työssä tarkasteltiin käytännössä muutamien kohteiden sisälämpötilan käyttäytymistä erilaisissa olosuhteissa. Sisälämpötilan muutosta analysoitiin suhteessa kellonaikaan sekä auringon säteilyyn. Lisäksi työssä analysoitiin patteriverkoston toimivuutta esimerkkitapauksena Schneider Electric Buildingsin Vantaan konttorilla.

Sisälämpötila-analyysissä hyödynnettiin viiden pääkaupunkiseudulle sijoittuvan kerrostalokohteen mittaustietoja. Kohteet olivat koulu Kalliossa, toimistotalo Kaisaniemessä, kaksi asuinkerrostaloa Jakomäessä ja kauppakeskus Espoossa. Kohteista saatiin lämpötilatietoja ja säätiedot saatiin Forecalta. Kohteiden lämpötilojen säädössä ei ollut käytössä erityisiä säätöalgoritmeja. Kohteista analysoitiin sisälämpötilan suhde kellonaikaan ja auringon säteilyyn niin arkena kuin viikonloppunakin.

Selkein ja tärkeä huomio oli, että kaikki kiinteistöt reagoivat eri tavalla. Sisälämpötilan käyttäytyminen kohteissa on erilaista ja riippuvuudet muihin tekijöihin ovat yksilöllisiä. Sisälämpötilan ja kellonajan riippuvuuden tarkastelussa huomattiin kolmessa kohteessa viidestä selkeä trendi, joka on kussakin uniikki. Jokaisessa näistä kohteista sisälämpötilakäyrän muoto seuraa perinteistä aikataulumallia, joka liittyy kunkin rakennuksen käyttötarkoitukseen. Voidaan siis tulkita, että näissä kohteissa ihmisten läsnäololla on suuri vaikutus rakennuksen lämpenemiseen. Auringon vaikutuksen määrittely aukottomasti oli vaikeaa minkään kohteen datasta. Erityisen hankalaa tulkinnasta tekee, että tutkittaessa virka-aikana käytössä olevia rakennuksia, osuu ihmisten oleskelu ja auringon säteily suurelta osin samaan aikaan. Viikonloppudatan vähäisen määrän takia auringon vaikutus kiinteistöjen sisälämpötiloihin pysyi huomattavan epävarmana.

Sisälämpötilan riippumattomuus kellonajasta on hyvä asia, mikäli se on osoitus hyvästä lämmityksen säädöstä, lämpökuormien vähydestä tai lämpökuormien tasaisesta jakautumisesta. Jos sisälämpötila pysyy koko käyttöajan optimaalisella tasolla, on säätö rakennuksessa erittäin hyvä. Käyttöajan ulkopuolella voidaan energiansäästösyistä antaa lämpötilan muuttua vapaasti. Vähäisellä oleskelulla, pienellä määrällä sähkölaitteita ja auringon säteilyltä suojaamisella voidaan pitää sisälämpötilaan vaikuttavien lämpökuormien taso pienenä.

Schneider Electric Buildingsin Finlandin Vantaan konttori on kaksikerroksinen rakennus, jonka tilojen kokonaispinta-ala on noin 2500 neliömetriä ja jossa työskente-

lee noin 100 henkilöä. Konttorissa on käytössä vesikiertoinen patteriverkosto, jota lämmitetään kaukolämmöllä. Konttorin datan tarkastelulla pyrittiin selvittämään lämmitysjärjestelmän toimivuutta. Huomio kiinnitettiin aluksi yhtäläisyyksiin patteriverkoston menoveden lämpötilan ja patteriverkoston kuluttaman tehon välillä, minkä tarkoituksena oli myöhemmin selvittää menoveden lämpötilan toimivuutta säädön syötteenä. Seuraavaksi konttorin datan perusteella tehtiin kellonaika- ja säävaikutustarkastelut.

Kiinteistön patteriverkoston tehoanalyysi aloitettiin laskemalla patteriverkoston teho mittausdatan perusteella. Näin saatiin teoreettinen riippuvuuskäyrä kiinteistön patteriverkoston tehon ja menoveden lämpötilan välille. Poikkeamaa toteutuneen tehon ja riippuvuuskäyrän välillä verrattiin aluksi kellonaikaan. Kaikista kuvaajista oli huomattavissa, että poikkeama oli positiivinen öisin ja virka-aikaan negatiivinen. Patteriverkosto ei siis päivisin luovuta juurikaan tehoa huoneisiin vaikka menovedenlämpötila on suhteellisen korkea. Tästä voidaan päätellä, että sisälämpötilat ovat kohdallaan ja olisi hyvinkin mahdollista laskea menoveden lämpötilaa. Tehojen poikkeaman ja auringon säteilyn välinen yhteys näkyy kuvissa selvästi niin, että aurinkoisella säällä poikkeama on negatiivinen. Näin ollen rakennus ottaa vähemmän lämmitysenergiaa patteriverkostosta aurinkoisella säällä, joten voidaan todeta aurinkoisuuden aiheuttavan rakennukseen tehontarvetta laskevaa kuormaa. Tehoanalyysissa päästiin siihen lopputulokseen, että olisi hyvinkin järkevää siirtyä ulkolämpötilaperusteisesta säädöstä tehooperusteiseen.

Sisälämpötilan ja kellonajan yhteyttä tutkittiin ja kuvien perusteella sisälämpötila nousee kiinteistössä päivisin. Lämmön nousua aiheuttaa arkisin tiloissa oleskelu ja sähkölaitteet. Myös viikonloppujen kuvissa on huomattavissa sisälämpötilan kasvua, jolloin lämpökuorma on säätilan eli erityisesti auringon aiheuttamaa. Auringon säteilyllä on siis yhteytensä sisälämpötilaan kiinteistössä ja korkeilla auringon säteilyn arvoilla huomataan sisälämpötilan minimiarvojen olevan suurimmillaan.

Lopulta työssä analysoitiin tarkemmin muutaman uuden lämmityksen säätöratkaisun potentiaalia ja kehitysmahdollisuuksia. Käsiteltävänä oli kaksi Schneider Electricin omaa säätöratkaisua, VTT:ssa ja Aalto-yliopistossa kehitetty menetelmä sekä Ruotsin ilmatieteenlaitoksella tuotettu lähestymistapa.

Outdoor Temperature Control (OTC) on Schneider Electric Buildingsin Ruotsin yksikössä kehitetty energiaa säästävä ratkaisu sisälämpötilan pitämiseksi tasaisena ulkolämpötilan vaihtelusta huolimatta. OTC eroaa muista sisälämpötilaa tasaisena pitävistä järjestelmistä nopean takaisinmaksuaikansa ansiosta. OTC ei tarvitse toimiakseen erillisiä sääennustetietoja vaan konsepti toimii ulkolämpötilan muutosten tunnistuksen avulla. OTC-konseptia voidaan hyödyntää Ruotsissa yleisesti käytössä olevan patteriverkoston vesipumpun pysäytyslogiikan kanssa (LPS) [1]. Ruotsissa on totuttu säättämään patteriverkostoa pumppujen pysäyttämällä. Vaikka säätilat ovat Suomessa vastaavia kuin Ruotsissa, ei Suomen rakennuskannan laitteisto välttämättä kestä pumppujen pysäyttämisiä.

Schneider Electric Buildingsissä on kehitetty sääennusteita hyödyntävää ennakkoivaa algoritmia rakennusten lämmityksen säätöön sekä uusissa että jo olemassa olevissa vesikiertoisissa lämmitysjärjestelmissä. Tässä ennakoivassa mallissa olennaisinta on, että se havainnollistaa, miten huomattavan helposti voidaan vähentää

rakennuksen energiankulutusta ja kuinka algoritmimuutoksilla myös jo olemassa olevissa järjestelmissä voidaan säästää huomattavia määriä energiaa. Malliin määriteltävän ajanjakson maksimipituus on riippuvainen rakennuksen aikavakiosta. Mitä vaaravampi rakennus on, sitä pidempää ajanjaksoa voidaan menetelmässä käyttää. Sisäilmastollisesti vaativimmissa kohteissa ennakoivan algoritmin toimivuutta voidaan vielä varmistaa sisälämpötilamittauksilla ja takaisinkytkä arvot järjestelmään.

Aalto-yliopistossa ja VTT:ssa kehitetty tilakonemalli on uudenlainen lähestymistapa rakennusten automatisointiin. Mallissa kuvattu lämmitysteho perustuu edellisiin syötteisiin ja tuloihin, jolloin se kuvaa sen hetkistä systeemin tilaa tarvitsematta sofistikoituneita algoritmeja [26]. Tilakonemalli pyrkii ratkaisemaan ongelmia, jotka ilmenevät kun joudutaan mallintamaan rakennuksen fysikaaliset ominaisuudet tarkasti. Mallissa ei joudutakaan määrittelemään fysikaalisia suureita, mikä vähentää huomattavasti työtä ja virheitä. Vaikka prosessoritehoa ei tilakonemallissa juuri vaaditakaan hienostuneiden algoritmien puutteen vuoksi, järjestelmä tarvitsee tallennettuja tilatietojaan varten huomattavat määrät muistia. Kyseisen mallin hyviä puolia on ehdottomasti sen tuore lähestymistapa perinteiseen säätöongelmaan ja mahdollisuus ottaa huomattava määrä suureita huomioon.

Ruotsin ilmatieteenlaitoksella on kehitetty fysikaalisperusteinen ratkaisu rakennusten lämmityksen säätöön ja minimoimaan energiankulutusta. Ratkaisussa hyödynnetään lämmityksen säätöön ekvivalenttilämpötilaa, joka lasketaan nettolämpötilan perusteella. Koska ekvivalenttilämpötilaa käytetään korvaamaan todellista ulkolämpötilaa, voidaan menetelmää soveltaa sekä uusissa että jo olemassa olevissa säätöjärjestelmissä [33]. Fysikaalisperusteinen tapa on perinteinen lähestymistapa rakennusten säätöön. Siinä on aina ollut ja on tässäkin ratkaisussa haasteena tarkkojen arvojen määrittely ja matemaattinen raskaus, joka vaatii järjestelmältä suurta prosessitehoa. Kyseisen ratkaisun hyvänä puolena on järkevien olettamusten tekeminen, joiden perusteella on pystytty määrittämään rakennuksille olennaiset tunnusluvut tiettyjen valmiiden pohjien perusteella. Tällä tavalla pystytään keventämään sekä määrittelyosuutta että mahdollisesti laskentaa.

Kokonaisuudessaan työ täyttää tarkoituksensa ja tavoitteensa hyvin. Työssä kerättiin laaja teoreettinen ymmärrys ja taustatieto niin rakennusten lämpökuormiin kuin ennakoivaan ja sääennustepohjaiseen säätöönkin. Kohteiden sisälämpötilan käyttäytymistä analysoitiin tavoitteiden mukaan. Vielä paremmin tavoite olisi saavutettu mikäli seurantadataa olisi ollut saatavissa pidemmältä ajanjaksolta. Näin olisi pystytty määrittelemään tarkemmin syy-seuraussuhteita. Patteriverkoston tutkimisen osalta tavoitteet saavutettiin ja todettiin siirtyminen lämpötilapohjaisesta säädöstä uuteen tehooperusteiseen säätötapaan erittäin järkeväksi. Olemassa olevien ennakoivien ja sääennustepohjaisten säätöratkaisujen kartoituksen tavoite saavutettiin erittäin hyvin teoreettisen tutkimuksen osalta. Niiden analyysi jäi kuitenkin osaltaan vajaaksi käytännön datan puutteen vuoksi.

Viitteet

- [1] Schneider Electric Sverige AB. Otc - l  t inte v  rsolen p  verka temperaturen inomhus.
- [2] A. Alessandri, F. Bini Verona, T. Parisini, ja A. Torrini. Neural approximations for the optimal control of heating systems, 1994.
- [3] Klemen Dovrtel ja Sao Medved. Weather-predicted control of building free cooling system. *Elsevier Applied Energy*, 88:3088–3096, 2011.
- [4] TEM:n Energiatehokkuustoimikunta. Energiatehokkuustoimikunnan mietint  : Ehdotus energians  st  n ja energiatehokkuuden toimenpiteiksi. Tekninen raportti, Ty  - ja elinkeinoministeri  , 2009.
- [5] Lea Gynther. Energians  st  n ja hiilidioksidip  st  jen vaikutusarviot - taustaraportti. Tekninen raportti, Motiva Oy. TEM:n Energiatehokkuustoi- mikunta, 2009.
- [6] Melissa Hart ja Richard de Dear. Weather sensitivity in household appliance energy end-use. *Elsevier Energy and Buildings*, 36:161–174, 2004.
- [7] Juhani Heljo, Eero Nippala, ja Harri Nuutila. Rakennusten energiankulutus ja co_2 -ekv p  st  t suomessa. Raportti 2005:4, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakentamistalouden laitos and VTT. Rakennuskannan ekotehokkaampi ener- giank  ytt   (EKOREM) -projekti, 2005.
- [8] S. J. Hepworth ja A. L. Dexter. Neural control of non-linear hvac plant, 1994.
- [9] Riikka Holopainen, Martti Hekkanen, Kari Hemmil  , ja Markku Norvasuo. Suo- malaisten rakennusten energiakorjausmenetelm  t ja s  st  potentiaalit. Tiedot- teita 2377, VTT, 2007.
- [10] Rakennustietos  ti   RTS ja LVI-Keskusliitto. L  mmitysverkoston s  t  . Oh- jekortti LVI 41-10230, Rakennustietos  ti   RTS ja LVI-Keskusliitto, 1994.
- [11] Rakennustietos  ti   RTS ja LVI-Keskusliitto. Vesikiertoinen patteril  mmitys. Ohjekortti LVI 12-10343, Rakennustietos  ti   RTS ja LVI-Keskusliitto, 2002.
- [12] Rakennustietos  ti   RTS ja LVI-Keskusliitto. Rakennusten l  mmitys. Ohje- kortti LVI 10-10397, Rakennustietos  ti   RTS ja LVI-Keskusliitto, 2006.
- [13] Juha Jokisalo, Jarek Kurnitski, Minna Korpi, Targo Kalamees, ja Juha Vin- ha. Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for finnish detached houses. *Elsevier Building and Environment*, 44:377–387, 2009.
- [14] Seppo Junnila. Rakentamisen energiatulevaisuus. Sitran raportteja 84, Sitra, 2009.

- [15] Osmo Kaleva. Mathematical foundations of soft computing. Tekninen raportti, TTY, Matematiikan laitos, 2005.
- [16] Henrik Karlsson ja Carl-Eric Hagentoft. Application of model based predictive control for water-based floor heating in low energy residential buildings. *Elsevier Building and Environment*, 46:556–569, 2011.
- [17] H.-B. Kuntze ja Th. Bernard. A new fuzzy-based supervisory control concept for the demand-responsive optimization of hvac control systems. Kirjassa *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision & Control*, 1998.
- [18] Kathryn J. McCartney ja J. Fergus Nicol. Developing an adaptive control algorithm for europe. *Elsevier Energy and Buildings*, 34:623–635, 2002.
- [19] Nicolas Morel, Manuel Bauer, Mario El-Khoury, ja Jens Krauss. Neurobat, a predictive and adaptive heating control system using artificial neural networks. *International Journal of Solar Energy*, 21:161–201, 2001.
- [20] J. Fergus Nicol. Time and thermal comfort: Evidence from the field. Kirjassa *World Renewable Energy Congress VI (WREC2000)*, 2000.
- [21] Motiva Oy. Lämmitysverkoston perussäätö säästää rahaa ja luo terveellisen sisäilmaston, 2002.
- [22] Motiva Oy. Energiaekspertti, 2011.
- [23] Swegon Oy. Järjestelmäteknikka, 2007.
- [24] Satu Paiho, Sami Karjalainen, Kari Alanne, Markku Norvasuo, Lasse Eriksson, Sanna Pöyhönen, Jani Kaartinen, ja Jorma Lehtovaara. Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut. Tiedotteita 2134, VTT, 2002.
- [25] Satu Paiho, Mia Leskinen, ja Panu Mustakallio. Automaatiojärjestelmän hyödyntäminen rakennusten energiatietoisien käytön apuvälineenä. Tiedotteita 2072, VTT, 2000.
- [26] Jouko Pakanen ja Sami Karjalainen. A state machine approach in modelling the heating process of a building. *Elsevier Energy and Buildings*, 41:528–533, 2009.
- [27] Petri Pietarinen ja Mikko Saari. Ilmanvaihtolämmityksen hajautettu automaatio. Tiedotteita 1859, VTT, 1997.
- [28] Timothy I. Salisbury. A survey of control technologies in the building automation industry. Tekninen raportti, Controls Research Department, Johnson Controls, Inc, 2005.
- [29] Olli Seppälä. *Rakennusten lämmitys*. Suomen LVI-yhdistysten liitto ry, 1995.

- [30] Jari Shemeikka, Risto Kosonen, Patrick Hoving, Päivi Laitila, Hannu Pihala, ja Tuomas Laine. Rakennuksen sähköenergiankulutuksen tavoitearvot. Tiedotteita 1756, VTT, 1996.
- [31] Jan Siroký, Frauke Oldewurtel, Jirí Cigler, ja Samuel Prívara. Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system. *Elsevier Applied Energy*, 88:3079–3087, 2011.
- [32] Suomen standardisoimisliitto SFS. Rakennusten energiatehokkuus. lämmityksen ja jäähdytyksen energiatarpeen laskenta. Standardi SFS-EN ISO 13790, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2008.
- [33] Roger Taesler. Method of controlling the heating of a building at a desired level. International application published under the Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 2007/061357 A1, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, 2007.
- [34] Pertti Värjä ja Jukka-Matti Mikkola. *Uusi kiinteistöautomaatio*. Mikro-oppi, 1999.
- [35] In-Ho Yang ja Kwang-Woo Kim. Prediction of the time of room air temperature descending for heating systems in buildings. *Elsevier Building and Environment*, 39:19–29, 2004.
- [36] Asuntoja-ja rakennusosasto Ympäristöministeriö. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, ohjeet 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma D5, Ympäristöministeriö, 2007.
- [37] Victor M. Zavala, Emil M. Constantinescu, Theodore Krause, ja Mihai Anitescu. On-line economic optimization of energy systems using weather forecast information. *Elsevier Journal of Process Control*, 19:1725–1736, 2009.
- [38] Victor M. Zavala, Jianhui Wang, Sven Leyffer, Emil M. Constantinescu, Mihai Anitescu, ja Guenter Conzelmann. Proactive energy management for next-generation building systems, 2010.